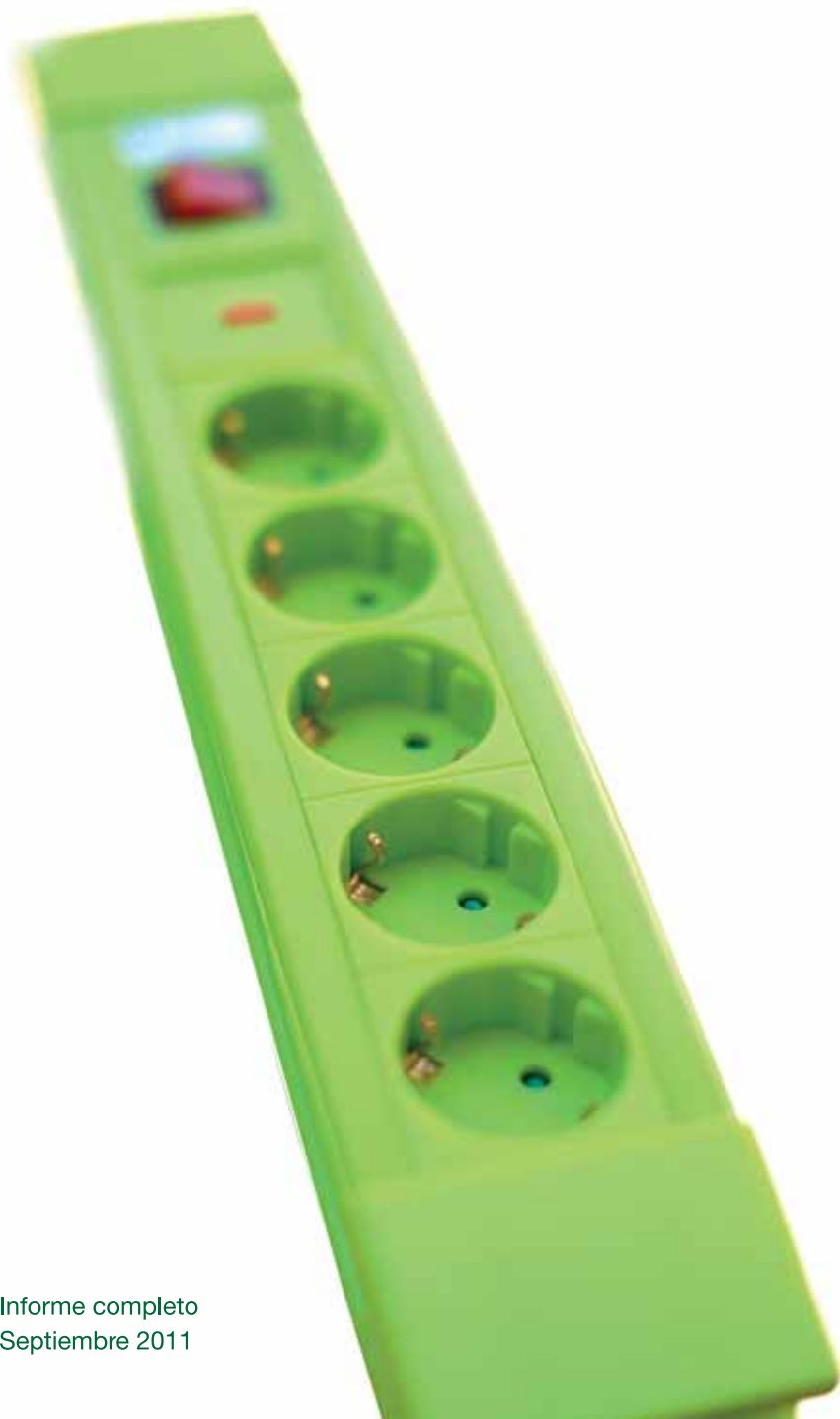


Energía 3.0

Un sistema energético basado en inteligencia,
eficiencia y renovables 100%



Informe completo
Septiembre 2011

GREENPEACE

www.greenpeace.es ■ www.revolucionenergetica.es

Energía 3.0

Un sistema energético basado
en inteligencia, eficiencia
y renovables 100 %

Informe completo elaborado
por Dr. Ing. Xavier García-Casals,
bajo contrato de Greenpeace España.

Diseño y maquetación:
ESPACIO DE IDEAS.

Este informe ha sido producido
gracias a las aportaciones
económicas de los socios de
Greenpeace.

Greenpeace es una organización
independiente política y
económicamente que no recibe
subvenciones de empresas,
gobiernos o partidos políticos.

Hazte socio en www.greenpeace.es

Septiembre 2011

Greenpeace España
San Bernardo 107, 1
28015 Madrid
T. 91 444 14 00
F. 91 187 44 56

info@greenpeace.es

imagen portada © PEDRO ARMESTRE



Índice

1	Introducción	5	3	Escenarios	89
1.1	Sobre este informe	8	3.1	Generalidades sobre los escenarios	90
1.2	Contexto general	10	3.1.1	Escenarios de integración de renovables y eficiencia	90
1.3	Contexto actual del sistema energético	11	3.1.2	Escenarios macro y de abajo-a-arriba	91
1.4	Los escenarios energéticos y su evolución	15	3.1.3	Escenarios BAU y eficientes	92
2	Planteamientos conceptuales	23	3.1.4	Escenarios de transición	92
2.1	Sobre los límites del crecimiento	24	3.2	Evolución histórica	94
2.2	Integración	33	3.3	Clima	95
2.3	Evolución en escalón	34	3.3.1	Revisión de la información relativa al cambio climático	96
2.4	Mecanismos de respuesta rápida	35	3.3.2	Planteamiento adoptado en relación al cambio climático	99
2.5	Transición hacia la era de la inteligencia	36	3.4	Crecimiento económico	101
2.5.1	Evolución planteamientos oferta-demanda	38	3.5	Población	102
2.5.2	Sistemas técnicos inteligentes	40	3.6	Sector transporte	103
2.5.3	Sistemas socioeconómicos inteligentes	40	3.6.1	Escenarios demanda movilidad	105
2.5.4	Sistemas políticos inteligentes	43	3.6.2	Escenarios reparto modal	121
2.6	Electrificación del sistema energético y sus repercusiones	44	3.6.3	Escenarios consumo específico modal	147
2.6.1	La descarbonización del sistema eléctrico	44	3.6.4	Escenarios de demanda total en el sector transporte	190
2.6.2	Electricidad residual	45	3.6.5	Calibrado del modelo de demanda de energía en el sector transporte	210
2.6.3	Implicaciones para las buenas prácticas del pasado	47	3.6.6	Escenario transición de BAU a E3.0	217
2.7	Mix 100% renovables en el contexto E3.0	78	3.7	Sector edificación	221
2.8	Economía sostenible: activación mecanismos respuesta rápida	83	3.7.1	Consideraciones previas	222
			3.7.2	Planteamiento del desarrollo de escenarios para el sector edificación	285
			3.7.3	Escenario superficie edificios	286
			3.7.4	Tipologías edificios consideradas	293
			3.7.5	Calibrado del consumo energético de los edificios	298
			3.7.6	Componentes de demanda energética y potencial de mejora	304
			3.7.7	Escenario demanda energética	331
			3.7.8	Escenario transición de BAU a E3.0	426

3.8 Sector industria	429	5 Cobertura de la demanda	537
3.8.1 Generalidades	430	5.1 Introducción	538
3.8.2 Situación actual y estructura energética	431	5.2 Estructura de la generación renovable	538
3.8.3 Otros escenarios	434	5.3 Estructura demanda energética	538
3.8.4 Elementos para el contexto E3.0	438	5.3.1 Demanda BAU	539
3.8.5 Escenario BAU	445	5.3.2 Demanda E3.0	542
3.8.6 Escenario E3.0	446	5.4 Demanda cronológica	545
3.8.7 Escenario transición de BAU a E3.0	449	5.4.1 Demanda BAU	545
3.9 Escenarios para los otros sectores energéticos	450	5.4.2 Demanda E3.0	555
3.9.1 Escenario sector primario	450	5.5 Cobertura de demanda BAU	564
3.9.2 Escenario sector servicios públicos	460	5.5.1 Cobertura de la demanda con generación BAU	565
3.9.3 Escenario sector usos no energéticos	463	5.5.2 Cobertura de la demanda con generación renovable	569
3.10 Escenarios demanda energética total	465	5.5.3 Coste total del sistema energético	579
3.10.1 Producción de combustibles en el contexto E3.0	471	5.5.4 Evolución temporal de costes	592
3.11 Escenarios de emisiones	475	5.6 Cobertura de demanda E3.0	597
3.11.1 Caracterización condiciones de partida	475	5.6.1 Cobertura desde el lado de la oferta	597
3.11.2 Escenarios de transición	480	5.6.2 Cobertura con gestión de la demanda	612
4 Costes	485	5.6.3 Coste total del sistema energético	623
4.1 Introducción	486	5.6.4 Evolución temporal de costes	630
4.2 Escenarios de costes	486	5.7 Escenarios de transición de costes	642
4.2.1 Energías renovables	487	5.8 Ocupación del territorio	645
4.2.2 Costes de emisiones de CO ₂	487	5.8.1 Elementos de contextualización sobre la ocupación del territorio	645
4.2.3 Combustibles fósiles	491	5.8.2 Resultados de ocupación del territorio del sistema energético	654
4.2.4 Energía nuclear: combustibles y O&M	508	6 Conclusiones	671
4.2.5 Hidrógeno	512	6.1 Conclusiones generales	672
4.2.6 Otros recursos energéticos	515	6.2 Conclusiones por capítulos	x
4.2.7 Costes normalizados de generación eléctrica fósil y nuclear	518	6.2.1 Conclusiones sobre los planteamientos conceptuales	680
4.3 Tratamiento de la evolución temporal del coste	523	6.2.2 Conclusiones sobre los escenarios	681
4.4 Sobre el coste del ahorro	526	6.2.3 Conclusiones sobre los costes	693
		6.2.4 Conclusiones sobre la cobertura de la demanda	695

7 Bibliografía	701





imagen

Grupo de aerogeneradores
del parque eólico de La Veleta, en
Monasterio de Rodilla (Burgos).

© PEDRO ARMESTRE

Introducción

1

1.1 Sobre este informe

Este informe recoge los resultados de un estudio destinado a explorar el potencial de la eficiencia energética y la inteligencia, para configurar un sistema energético en la España peninsular abastecido al 100% con energías renovables, que mantenga el uso de recursos y el despliegue de infraestructuras dentro de unos límites que nos permitan situarnos en una senda de sostenibilidad, para explorar un modelo de desarrollo exportable al resto del planeta, y por tanto, con potencial de impactar en los plazos disponibles sobre las problemáticas globales que afrontamos.

Por tanto, el tema principal que analizamos no es la posibilidad o no de cubrir la demanda energética con energías renovables, aspecto que ya consideramos afirmativamente resuelto a raíz de estudios como (Greenpeace, 2005 y Greenpeace, 2007) y una gran variedad de estudios publicados durante los últimos cuatro años¹, sino el cómo hacerlo limitando el despliegue de infraestructuras de generación, transporte y distribución a cantidades económica y ambientalmente asumibles.

En (Greenpeace, 2005 y Greenpeace, 2007) desarrollamos un análisis del potencial y la viabilidad técnico-económica asociados a cubrir la demanda total de electricidad en la España peninsular, basándose en un 100% de aporte renovable con una demanda totalmente BAU², es decir, absolutamente ciega a las necesidades y posibilidades del sistema de generación, y con una muy limitada incorporación de criterios de eficiencia energética. Este enfoque BAU, desde el lado de la demanda, estaba destinado a mostrar que incluso en el contexto actual en el que el sistema eléctrico se opera y regula desde el lado de la oferta, la combinación de las distintas tecnologías renovables nos proporcionaba suficientes herramientas³

para cubrir la totalidad de la demanda eléctrica sin requerir un cambio fundamental del statu quo actual. En (García Casals, X., 2009: Info fund. Ideas) se amplió este análisis para analizar el periodo de transición y las capacidades de ir sustituyendo los parques nuclear y fósil, que actualmente tenemos en el sistema eléctrico dentro de este mismo planteamiento BAU por el lado de la demanda, para concluir que con los ritmos de implementación de renovables que actualmente ya hemos demostrado en nuestro país, la transición a un 100% renovable podía alcanzarse mucho antes⁴ del año 2050.

Este enfoque BAU por el lado de la demanda, limitado al sector eléctrico tal y como lo concebimos actualmente, resultaba apropiado en el sentido de que permitía focalizar uno de los puntos fundamentales, esto es la viabilidad de operar un sistema de generación eléctrica apoyado exclusivamente en las renovables, sin necesidad de requerir para ello la implementación de otros cambios estructurales, y por tanto, sin excusas para no acometer desde ya mismo dicha transición.

Sin embargo, la problemática global va más allá del sector eléctrico tal y como lo concebimos actualmente, y hay formas más eficientes de afrontar la problemática desde un punto de vista global, que el contexto BAU, en el que se busca la solución exclusivamente desde el lado de la oferta. Por tanto, una vez internalizado el hecho de que las tecnologías renovables constituyen una solución válida y adecuada para resolver el problema, procede profundizar en el contexto global del sistema energético y su interacción con otros sistemas como el económico, para liberar todos los grados de libertad disponibles, que permitan reconvertir de forma eficiente el sistema energético en los cortos plazos de tiempo disponibles.

¹ Ver bibliografía de este informe.

² BAU: Business As Usual (seguir como hasta ahora).

³ Tanto de generación como de regulación, para permitir garantizar una cobertura total de esa demanda ciega.

⁴ En concreto, el parque nuclear podría acabar de cerrarse en el año 2016 y el fósil en el año 2025.

En este informe procedemos, en primer lugar, a analizar una serie de conceptos que pasan a ser importantes al considerar un enfoque integral del problema, y que en el marco de este enfoque global pueden conducir a replantearnos algunos conceptos previos que hasta ahora dábamos por buenos.

A continuación desarrollamos un análisis sectorial detallado que parte de la situación actual y elabora escenarios de evolución hasta el año 2050 en contextos BAU y de eficiencia (E3.0)⁵ de la demanda energética sectorial, así como de su estructura. En este desarrollo de escenarios se ha dedicado la mayor parte de los recursos a detallar más el potencial de eficiencia de los sectores difusos dominantes (edificación y transporte), pues son precisamente estos sectores los que pasarían a dominar la demanda energética en un contexto BAU, y donde residen los mayores potenciales de eficiencia energética. El resto de sectores ha recibido un tratamiento más simplificado en la elaboración de escenarios, bien porque su potencial de mejora en la eficiencia sea menor, como es el caso del sector industria⁶, o bien porque su peso en la estructura energética sea mucho menos relevante⁷ como son los otros sectores que incluimos en el análisis, con el fin de disponer de una representación completa del sistema energético.

Finalmente, procedemos a analizar la estructura de un sistema energético integrado basado en renovables para dar cobertura a la demanda de energía total, tanto en los contextos BAU como E3.0.

Aunque el análisis se limita aparentemente al contexto del sistema energético, para alcanzar el contexto E3.0 en los plazos de tiempo disponibles es preciso extender el ámbito de actuación más allá del sistema energético para abarcar los sistemas económico, social y

político. Por tanto, implícitamente dentro del contexto E3.0 se encuentra la necesidad de activar procesos de cambio dentro de estos otros sistemas.

Las energías renovables constituyen una de las piezas fundamentales para catalizar el proceso de cambio requerido: sus tecnologías se encuentran actualmente disponibles y avanzando a gran velocidad por las curvas de aprendizaje, son fácilmente democratizables al huir de la dicotomía entre ganadores y perdedores en la que tradicionalmente nos hemos estructurado como sociedad, son compatibles con las restricciones de nuestro sistema climático, tienen capacidad de cubrir nuestra demanda actual, y tienen la capacidad de hacerlo manteniendo acotado y asequible el coste económico asociado.

Sin embargo, la aplicación de energías renovables a la cobertura de la demanda no es suficiente para garantizar la transición hacia un sistema energético sostenible, ni para proporcionar un patrón de desarrollo sostenible que pueda ser exportado a otras partes del planeta. La evolución hacia un contexto de inteligencia en el que todos los sistemas, y sus componentes, adquieran un papel activo en la operación de nuestra sociedad es una condición sine qua non tanto para colocarnos en una senda de sostenibilidad, como para implementar la necesaria transición en los cortos periodos de tiempo, que nos ha dejado como herencia nuestra histórica irresponsabilidad en afrontar las problemáticas a las que ha conducido nuestra evolución en este planeta. En efecto, el despliegue de inteligencia por nuestros sistemas social, político, económico y energético, pone a nuestra disposición toda una serie de mecanismos de cambio en escalón que nos permitirían superar las curvas de evolución tendencial para desarrollar los cambios requeridos en un espacio de tiempo

⁵ E3.0: contexto de eficiencia desarrollado en el informe *Energía 3.0*.

⁶ En efecto, este sector ha avanzado ya más que los otros dos sectores dominantes en la aplicación de medidas de eficiencia, y si bien queda cierto margen para mejorar su demanda, el potencial de ahorro es menor que en los dos sectores difusos dominantes. Sin embargo, en el escenario eficiente, gracias al gran despliegue de medidas de eficiencia en los dos sectores difusos dominantes, el sector industria vuelve a recuperar el protagonismo en la estructura energética que tuvo en el pasado.

⁷ Si bien, alguno de estos otros sectores, como el primario, tiene un impacto en la estructura de emisiones de GEI que va mucho más allá de su repercusión energética. Pero en este estudio nos limitamos al análisis del sistema energético y las repercusiones de los distintos sectores sobre el mismo.

mucho más corto. Sin embargo, para liberar todos estos mecanismos es preciso que articulemos todas las dimensiones de esta inteligencia: la tecnología inteligente, por sí sola, no va a tener capacidad de apartarnos de una trayectoria tendencial que no conduce al objetivo final deseado, y que tarda mucho más en recorrer el camino.

Desde el punto de vista tecnológico, dentro del sistema energético, la primera manifestación de la inteligencia es el despliegue a gran escala del potencial de la eficiencia energética. Las tecnologías disponibles, y las que madurarán durante el proceso, afortunadamente nos permiten introducir grandes reducciones del consumo de energía, hasta tal punto que la contribución de la eficiencia energética en la mitigación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) puede ser tanto o más importante que la contribución de las energías renovables. Pero el potencial de la inteligencia va mucho más allá, al articular mediante las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) la distribución de la información y capacidad de actuación por todos los nodos del sistema energético, que proporciona la capacidad de responder en tiempo real a las necesidades del sistema desde los puntos con mayor capacidad de influencia, que si va acompañada de una distribución de inteligencia por los sistemas político, económico y social nos conduce a un cambio fundamental en la operación de nuestro sistema energético: la evolución de los sistemas tradicionales gobernados exclusivamente desde el lado de la oferta a los sistemas principalmente gobernados desde el lado de la demanda, con un potencial de introducir flexibilidad en el sistema muy superior y mucho más económico que las medidas concebidas y operadas desde el lado de la oferta. En estas condiciones, conceptos de los que ya estamos

empezando a oír hablar como redes eléctricas inteligentes, edificios inteligentes, sistemas de transporte inteligentes, al interactuar con sistemas económicos, políticos y sociales inteligentes⁸ nos pueden abrir las puertas a una evolución en escalón que nos sitúe en una senda de desarrollo sostenible en los cortos plazos de tiempo disponibles.

1.2 Contexto general

El modelo de organización y desarrollo que ha desplegado la especie humana en el planeta Tierra, con una nula internalización de los requerimientos impuestos por las condiciones de contorno del sistema en el que vivimos, nos ha conducido a una situación límite que se ha puesto en evidencia con la crisis climática que ha provocado.

La respuesta del sistema climático, una vez superada la capacidad de carga de la especie humana en el mismo, está siendo mucho más contundente incluso que lo proyectado por los modelos relativamente conservadores del último informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) (Solomon, S., et al., 2007), desencadenando ya *mecanismos de respuesta lenta* como el derretimiento de capas de hielo continentales (por ejemplo: Groenlandia) y la liberación de carbono del permafrost que no se preveía que entraran en juego hasta dentro de varias décadas (PIRC, 2008), (Hansen J., et al., 2008).

El forzamiento al que ya hemos sometido al sistema climático, sin necesidad de forzamientos adicionales, es suficiente por sí mismo para desencadenar un cambio climático con impactos de gran magnitud (Hansen, J., et al., 2008). Por tanto, solo contamos con la inercia del sistema climático para modificar nuestros modelos de organización y desarrollo antes de

⁸ De lo contrario, es decir, si el despliegue de inteligencia se limita a actuaciones tecnológicas gobernadas fundamentalmente desde el lado de la oferta, tal y como apuntan las primeras iniciativas en esta dirección, esta inteligencia difícilmente va a proporcionar un elemento diferencial con capacidad de apartarnos de una evolución tendencial para la que ya no disponemos de tiempo.

alcanzar sus puntos de no retorno, de tal forma que se eviten las consecuencias del forzamiento climático que estamos ejerciendo. Este contexto introduce un componente fundamental: el de la *urgencia* en desarrollar e implementar los cambios a suficiente escala como para invertir las tendencias y la reacción del sistema climático.

Tal y como indica (Stern, N., 2006) no se trata de un tema de costes, pues actuar en la dirección deseada resulta 20 veces más económico que los costes de compensar los efectos de ese cambio climático. El verdadero desafío estriba por tanto en ser capaces de introducir este cambio con los cortos plazos⁹ de tiempo disponibles¹⁰, para lo cual necesitamos poner en juego *mecanismos de respuesta rápida* en todos nuestros sistemas (político, social, económico, técnicos...) con la capacidad de introducir *cambios en escala* (la única forma de ajustarnos a los requerimientos). Y en este contexto, todos los sectores energéticos, pero especialmente los difusos, tienen un papel muy importante a jugar, tanto por su tamaño (peso en la demanda energética y las emisiones), como por su capacidad de articular varios de estos mecanismos de respuesta rápida.

El consumo de energía para mantener en operación los engranajes de nuestra organización social es el principal responsable de las emisiones de GEI, y los sectores difusos tienen actualmente un peso muy importante en la estructura del consumo energético, y al mismo tiempo un gran potencial de liberarnos de ese peso.

Pero más allá del aspecto coyuntural del cambio climático, de lo que se trata es de abordar y dar solución de forma definitiva a toda una serie de ineficiencias, perversiones e injusticias de nuestro modelo de organización

como especie en este planeta que hacen insostenible, desde todos los puntos de vista, la situación actual. Necesitamos evolucionar hacia modelos de organización y producción que sean compatibles con las condiciones de contorno que nos imponen nuestro planeta y su sistema climático, pero también que sean accesibles y equitativos para el conjunto de la población, para romper con el imperativo actual de estructurarnos en ganadores y perdedores¹¹.

No cabe duda de que el sistema energético tiene una gran repercusión sobre la situación de insostenibilidad actual, al encontrarse en el núcleo neurálgico de nuestra organización como especie, y ser el responsable directo tanto del forzamiento al que estamos sometiendo al sistema climático, como de las desigualdades en las que nos hemos estructurado. Sin embargo, por importante que sea el sistema energético, en el contexto actual no podemos esperar encontrar una solución que provenga unilateralmente de este sistema, y es imprescindible acometer un enfoque de *integración*, tanto dentro del sistema energético, como de la interacción de este sistema con otros como el económico, social y político.

1.3 Contexto actual del sistema energético

La estructura actual de nuestro sistema energético está dominada, aproximadamente a partes iguales, por los tres grandes sectores energéticos: industria, transporte y edificación.

En efecto, tal y como vemos en la figura 1 procedente de los balances de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) para el año 2007 en España, los pesos relativos de cada uno de estos tres sectores en el consumo energético total, en términos de energía final, eran

⁹ Alcanzar un máximo en las emisiones mundiales de CO₂ para el año 2015-2020 ya parece hoy en día una tarea titánica.

¹⁰ Los cortos plazos de tiempo disponibles son consecuencia directa de nuestra falta de actuación en el pasado.

Retrasar la actuación incrementa los requerimientos de velocidad de cambio. y, probablemente, ahora ya estemos ante la situación límite en la que hay alguna probabilidad de afrontar el desafío con éxito.

¹¹ Resulta curioso ver cómo hoy en día, el argumento de la ventaja competitiva sigue siendo el principal, incluso para activar los procesos de cambio. En el contexto de crisis actual, al plantear la opción de un nuevo modelo energético, se hace con el principal argumento de la ventaja competitiva en la que se va a posicionar el país que sea pionero en la implementación de estos nuevos modelos: es decir, se promueve dicho cambio de modelo con el argumento fundamental de poder venderlo en el futuro a terceros. Si bien podemos aprovecharnos de estas fuerzas para estimular en inicio del proceso de cambio, en breve tendremos que internalizar la necesidad de ampliar las fronteras que usamos para definir "nuestro equipo" desde las fronteras nacionales actuales hasta las del conjunto de la humanidad, si realmente queremos aspirar a encontrar una solución a los problemas globales con los que nos enfrentamos.

de 25,4% para la industria, de 37,7% para el transporte, y de 24,5% para el sector edificación. En términos de energía primaria, incorporando el valor medio del rendimiento de nuestro sistema eléctrico según el balance de la AIE, la estructura de nuestro sistema energético sería la mostrada en la figura 2, en la que podemos observar cómo los tres sectores dominantes están todavía más equilibrados,

con un 28,7% para el sector industrial, un 28,4% para el sector transporte, y un 32,9% para el sector edificación.

En la figura 3 mostramos la evolución del consumo de energía final en España a lo largo de los últimos 20 años (datos Eurostat). Como podemos observar, los sectores difusos (transporte y edificación) son los que han

Figura 1. Estructura consumo energético en España, en términos de energía final (elaboración propia a partir de Energy balances AIE 2007, consultado 2/10).

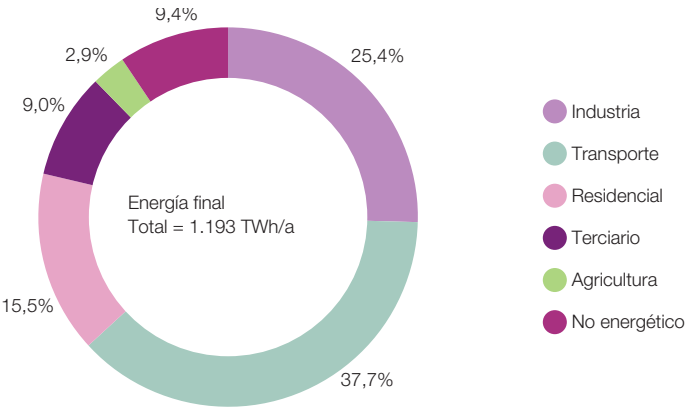
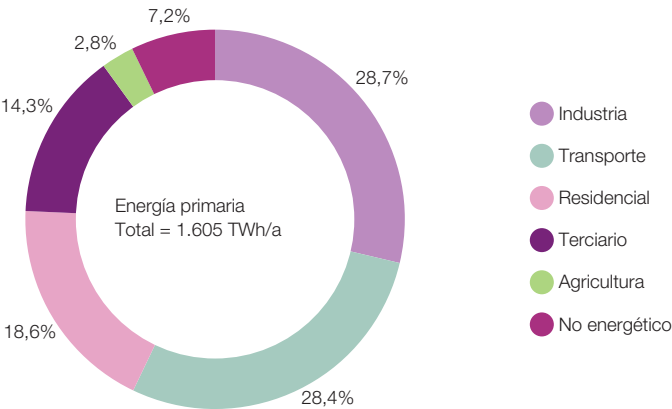


Figura 2. Estructura consumo energético en España, en términos de energía primaria (elaboración propia a partir de Energy balances AIE 2007, consultado 2/10).



experimentado un mayor crecimiento en este periodo, y siguen manteniendo una tendencia creciente. Por el contrario, el sector industria tuvo un crecimiento mantenido entre los años 1996 y 2004 para posteriormente estabilizarse e iniciar una ligera tendencia decreciente. En términos de energía final, el sector transporte domina la estructura de consumo energético, pero dado que la electrificación

del sector edificación es muy superior, tal y como muestra la figura 4, en términos de energía primaria el sector edificación y el sector industria están bastante equilibrados. Si analizamos para los años más recientes la evolución del consumo de energía final per cápita (figura 5) podemos observar cómo se hace más patente la tendencia decreciente del consumo desde el año 2005.

Figura 3. Evolución del consumo de energía final y su reparto sectorial (datos Eurostat).

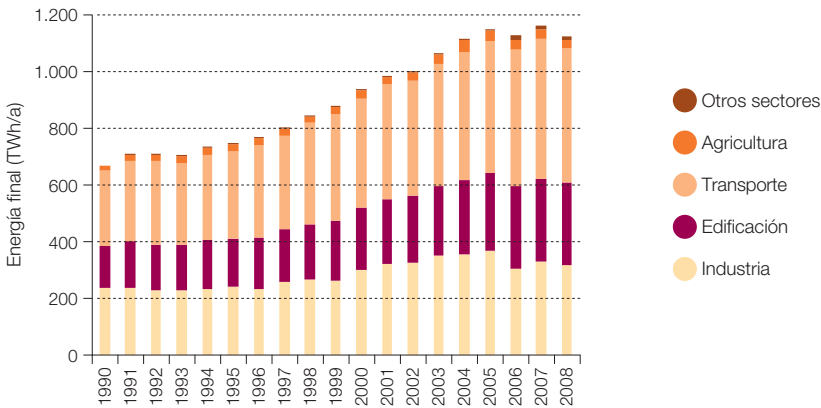


Figura 4. Evolución del consumo de electricidad de los tres sectores energéticos principales (datos Eurostat).



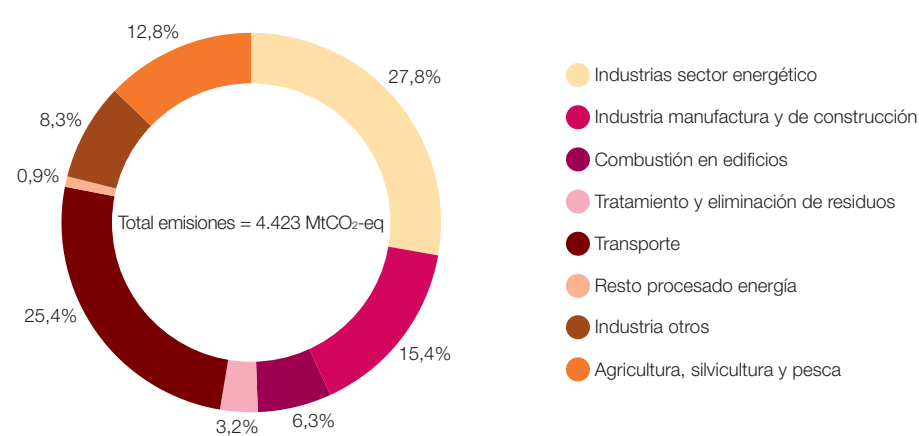
En cuanto a emisiones de CO₂ se refiere, en la figura 6 presentamos la información procesada a partir de la versión publicada en 2009 por el Ministerio de Medioambiente del Inventario de emisiones (MMA, 2009). Según esta foto, la participación del sector edificación en el total de emisiones sería muy inferior a la que se deduce de su contribución al consumo energético anteriormente presentada, lo cual se debe

exclusivamente al hecho de que la única contribución reflejada en el sector edificación, de cara al inventario de emisiones, es la debida a la combustión directa en edificios, y no quedan incorporadas todas las emisiones indirectas debidas al sector edificación y asociadas al uso de una forma de energía final (como la electricidad), que se ha transformado en otro sector energético (el industrial en este caso), al cual

Figura 5. Evolución del consumo de energía final per cápita y su reparto sectorial (datos Eurostat).

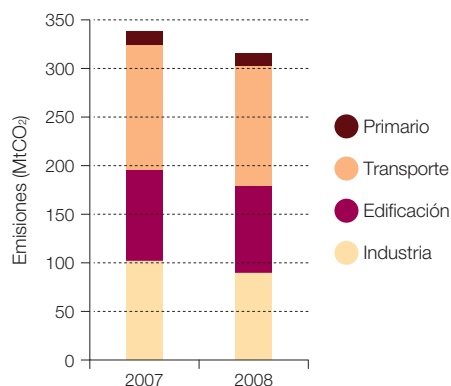


Figura 6. Estructura emisiones CO₂-eq en España en 2007 (elaboración propia partir de datos (MMA, 2009)).



se han cargado las emisiones correspondientes a su producción. Este reparto de las emisiones distorsiona bastante la foto en relación a cuál es el origen de que se produzcan esas emisiones. Sin embargo, en esta figura podemos observar la contribución a las emisiones de las industrias de manufactura y construcción, muy vinculadas al sector edificación.

Figura 7. Emisiones de CO₂ de origen energético imputables a los distintos sectores. Elaboración propia a partir de datos de Díaz Carazo, J. (et al., 2009) repartiendo las emisiones asociadas a la operación del sistema energético (pérdidas y autoconsumos) entre los distintos sectores según su participación en cada tipo de energía final.



En (Díaz Carazo, J., et al., 2009) puede encontrarse una imputación sectorial de las emisiones de CO₂ de origen energético entre los distintos sectores. Si añadimos a esta imputación las emisiones asociadas a la operación del sistema energético (pérdidas y autoconsumos), repartidas entre los distintos subsectores según su participación en el consumo

de los distintos tipos de energía final, obtenemos la evolución recogida en la figura 7 para las emisiones de origen energético en los años 2007 y 2008.

1.4 Los escenarios energéticos y su evolución

La elaboración de escenarios sobre el consumo energético lleva haciéndose desde hace muchos años, pero desde principios de este siglo, y especialmente en los últimos años, se ha producido una gran proliferación de escenarios. El hecho de que ahora ya empiece a ser evidente que la especie humana ha llegado a los límites de las condiciones de contorno a las que nos somete el planeta Tierra, tanto en la disponibilidad de recursos como en lo que se refiere a los impactos que producimos, hace que los escenarios, como herramientas para desplegar distintas opciones de evolución futura, hayan cobrado un interés especial, y máxime cuando algunas de las sendas de evolución posible se separan por completo de la trayectoria histórica que hemos seguido y por tanto requieren de la cuantificación mediante los escenarios para darnos una idea de sus implicaciones y requerimientos. Estamos en una época de toma de decisiones estructurales y cambios de rumbo, y no tenemos la opción de transferir estas decisiones a las generaciones futuras¹², pues su propia existencia en las condiciones que hemos conocido hasta ahora depende de las decisiones que tomemos.

El sector energético se encuentra en el ojo del huracán de esta situación actual, pues por un lado se enfrenta al agotamiento inminente de los recursos energéticos en los que han fundamentado su proceso de desarrollo y su estatus quo actual los países ricos, sin

¹² En esto, la situación actual claramente se aparta del BAU de evolución de la especie humana.

disponer de una alternativa para la mayoría de la humanidad que ya ha iniciado el recorrido de la misma senda acelerando de forma desconocida hasta ahora la velocidad a la que se agotan los recursos fósiles, y por otro lado, en esta huida hacia adelante el sistema energético se ha convertido en el principal responsable de la superación de la capacidad de carga de nuestro sistema climático, conduciendo a una situación límite que ha adelantado en cuanto a urgencia incluso al propio agotamiento de los recursos. En esta situación se entiende la proliferación de escenarios energéticos a la que estamos asistiendo en los últimos años¹³.

Resulta interesante hacer un breve recorrido por la evolución de estos escenarios a lo largo de los últimos años, pues de ellos se pueden extraer algunas conclusiones interesantes y enmarcar mejor los resultados de los escenarios desarrollados en este informe.

Para ello, hemos elegido centrarnos en los escenarios de alcance mundial¹⁴, y emplear el indicador de energía primaria. Por lo que respecta a los horizontes temporales de los escenarios, hemos elegido los asociados al año 2030 y al año 2050, pues si bien en los últimos años la mayoría de escenarios ya apuntan al año 2050, nos interesaba retener un poco más de trayectoria histórica en la elaboración de escenarios. Los autores de los escenarios que vamos a recoger en este punto, van desde los que podríamos considerar más conservadores, como Shell y la Agencia Internacional de la Energía, hasta los más progresistas como los escenarios de [R]E promovidos por Greenpeace (GP) y Consejo Europeo de Energía Renovable (EREC) y elaborados por el Instituto de Termodinámica Técnica del Centro Aeroespacial Alemán (DLR).

Por un lado vamos a presentar los escenarios BAU correspondiente a cada uno de estos estudios, con el fin de observar la evolución del propio concepto BAU en unos pocos años, y por separado recogeremos los escenarios eficientes de cada uno de estos estudios. Las fuentes de energía primaria las presentaremos por simplicidad agrupadas en tres categorías: fósil, nuclear y renovables. A estas tres formas de energía primaria le añadiremos, para el caso de los escenarios eficientes, una cuarta categoría para representar el efecto de las medidas de eficiencia energética. Para cada uno de los escenarios eficientes, la contribución de la eficiencia se evalúa con respecto a su escenario BAU asociado, y dado que los BAU difieren para cada caso, no podemos extraer conclusiones comparativas de la exigencia de las medidas de eficiencia introducidas en cada escenario a partir de la comparación entre los valores absolutos de los ahorros alcanzados¹⁵.

En las figuras 8 y 9 recogemos los resultados correspondientes a los escenarios para el año 2030, mientras que en las figuras 10 y 11 mostramos los resultados de los escenarios para el año 2050.

Al observar los escenarios BAU, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Todos ellos están claramente dominados por los combustibles fósiles, si bien el peso relativo de esta fuente energética se va reduciendo a lo largo de estos últimos 10 años para los propios escenarios BAU. Es decir, los BAU, por sí mismos y en periodos de tiempo tan cortos como 10 años, tienden hacia una creciente participación de las energías renovables.
- Excepto por uno de los escenarios de Shell del año 2001 que intentaba reflejar la posible evolución del consumo de energía,

¹³ En la bibliografía de este informe se citan referencias a la mayoría de estos estudios.

¹⁴ Esto limita bastante el conjunto de escenarios, pues muchos tienen un alcance más regional. Además, desde el punto de vista de la interpretación de los resultados, debe tenerse en cuenta que para que se materialicen estos escenarios a nivel global, los países que como España ya han avanzado por la senda convencional del proceso de desarrollo, deberían haber materializado escenarios más progresistas en los mismos.

¹⁵ En efecto, cuanto más eficiente sea el BAU asociado a cada escenario, menor margen queda para las medidas de eficiencia en el escenario eficiente correspondiente.

asociado a las actitudes y tendencias que parecía que podían establecerse en este S. XXI, la tendencia en el resto de BAU es a predecir un consumo de energía creciente hasta los escenarios elaborados en el año 2007–2008, y a partir de ese instante los escenarios BAU proyectan un menor consumo de energía: los BAU se están volviendo cada vez más eficientes en los últimos años.

- Excepto por el primer escenario de la AIE recogido en estas figuras elaborado el año 2002, las energías renovables en los BAU proporcionan, tanto en 2030 como en 2050, una contribución significativamente más importante que la energía nuclear a la cobertura de la demanda.

Estos hechos proporcionan por sí mismos una clara confirmación de que las tendencias que se exploran en los escenarios eficientes, que conducen a una gran participación de la eficiencia energética y las energías renovables, constituyen la única vía de evolución posible, y por tanto, hay que entender sus proyecciones como una luz que nos ilumina la senda a recorrer para anticipar los pasos que tenemos que ir dando, barriendo del panorama la inercia que nos haría retrasar de forma irreversible la adopción de las medidas necesarias.

Por lo que respecta al análisis de las figuras correspondientes a los escenarios eficientes, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- En los escenarios para el año 2030 elaborados en el primer periodo de tiempo (hasta el año 2007), las renovables tienen un mayor peso que las medidas de eficiencia, pero en los escenarios elaborados a partir de ese año, la eficiencia energética gana peso sobre las renovables. En los escenarios para

el año 2050, exceptuando el escenario de Shell, la eficiencia y las renovables se encuentran muy equilibradas hasta el año 2007, a partir de cuyo instante la eficiencia pasa a dominar a las renovables en su contribución a la reducción de combustibles fósiles, si bien en el escenario de año 2010 vuelve a invertirse esta tendencia como consecuencia de la mayor eficiencia del BAU considerado.

- Para los escenarios a 2050 de la segunda mitad del periodo considerado (elaborados a partir de 2007), los procedentes de entidades más conservadoras (AIE) tienen un gran parecido con los elaborados por entidades más progresistas, y se muestra una convergencia entre los planteamientos de unas y otras, con las entidades conservadoras arrastrando un desfase de unos pocos años.
- Si nos centramos en analizar los escenarios elaborados en 2008, podemos observar que la principal diferencia entre el escenario de la AIE y el de GP está precisamente en el escenario BAU: En efecto, el escenario de GP parte de un BAU bastante más eficiente que el de la AIE, hasta tal punto que la diferencia de eficiencia entre ambos BAU es mayor que la contribución nuclear en el escenario de la AIE.
- El escenario de GP para 2010 parte de un BAU todavía más eficiente, es decir, internaliza las medidas de eficiencia en el BAU, de tal forma que el margen adicional que le queda a la eficiencia en el escenario eficiente es menor, y las renovables vuelven a dominar, para dejar tan solo un pequeño residuo para los combustibles fósiles.

Esta internalización de la eficiencia en los escenarios BAU, además de tener una lógica

Figura 8. Escenarios BAU mundiales de consumo de energía primaria para el año 2030 procedentes de distintas referencias. (WEO: World Energy Outlook de la AIE; [R]E: Revolución Energética).

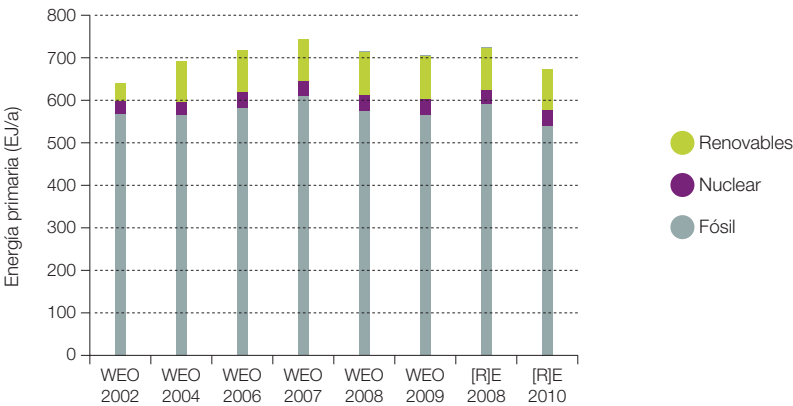


Figura 9. Escenarios Eficientes mundiales de consumo de energía primaria para el año 2030 procedentes distintas referencias (WEO: World Energy Outlook de la AIE; [R]E: Revolución Energética).

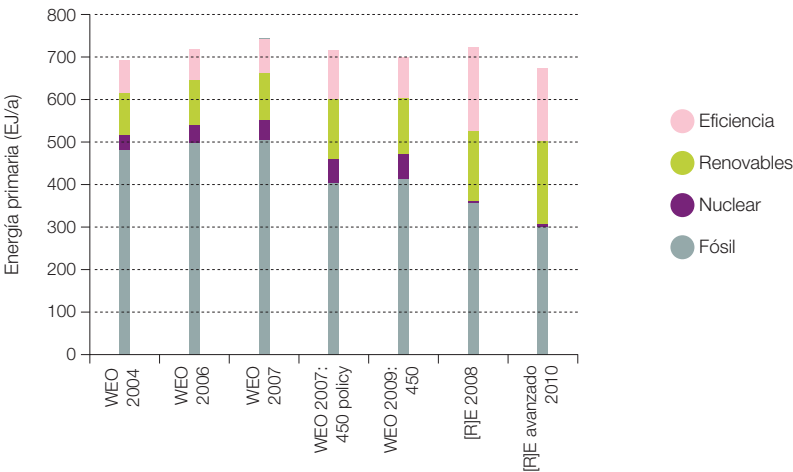


Figura 10. Escenarios BAU mundiales de consumo de energía primaria para el año 2050 procedentes distintas referencias. (ETP = Energy Technology Perspectives de la AIE).

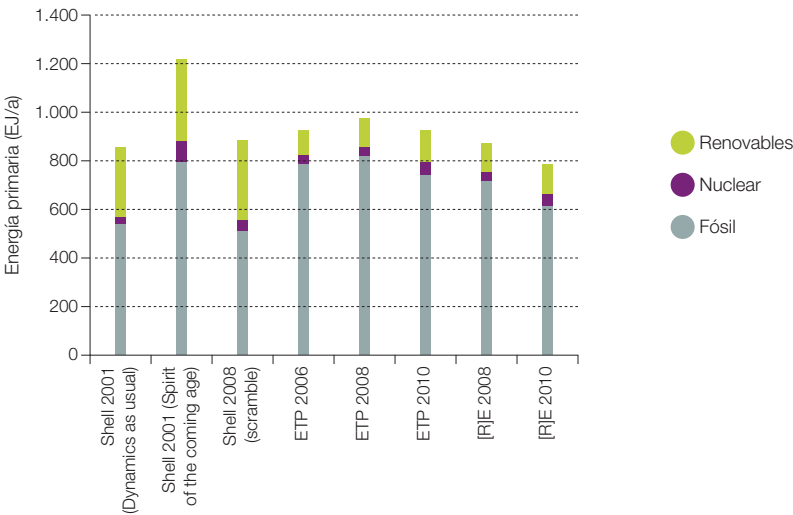
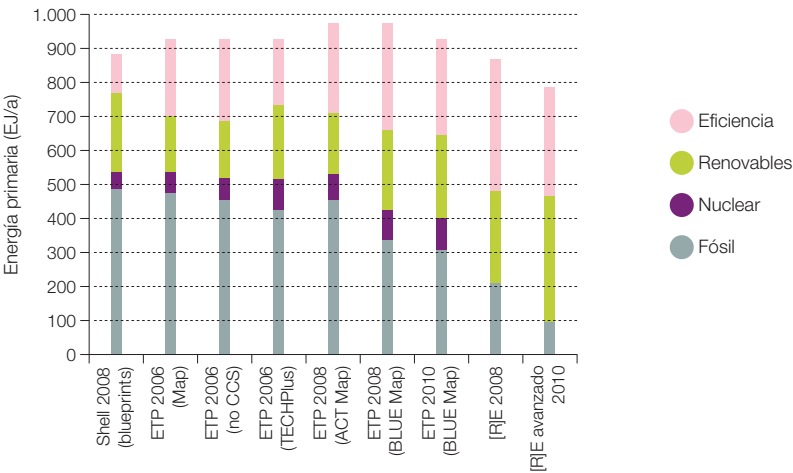


Figura 11. Escenarios Eficientes mundiales de consumo de energía primaria para el año 2050 procedentes distintas referencias (ETP = Energy Technology Perspectives de la AIE).



aplastante¹⁶, es un reflejo de que ya estamos empezando a evolucionar en la dirección marcada por los escenarios eficientes: al menos ya nos hemos convencido de que ese es el camino a recorrer hasta el punto de plasmarlo en los escenarios BAU, ahora tan solo nos queda empezar a andar por ese camino...

Por tanto, vemos cómo los escenarios energéticos, mediante la cuantificación del efecto de distintas opciones estratégicas, van manteniendo una luz encendida por delante de este camino desconocido de evolución que estamos siguiendo, y a menudo nos descubre rincones o posibilidades de esa evolución que ni tan solo nos habíamos planteado como posibles unos pocos años atrás:

- El aporte nuclear se cae por sí solo del escenario energético solo con avanzar un poco más por el camino irrenunciable de la aplicación de medidas de eficiencia. En este sentido, el aporte nuclear es completamente prescindible, y si en algún escenario se mantiene su participación no es por necesidad sino por otros argumentos secundarios. Por tanto, el mantener o no este aporte al sistema energético pasa por una valoración completa de sus pros y sus contras, pero sin el postulado previo de que sea imprescindible, y desde luego sin ningún argumento de urgencia para solucionar la crisis climática actual: la crisis la tenemos que resolver de forma inmediata con las herramientas ya disponibles que han mostrado capacidad suficiente para enderezar esta situación, esto es, la eficiencia y las renovables. El debate sobre la energía nuclear está fuera de este contexto y disponemos de mucho más tiempo para ir esclareciéndolo.

- Es factible, y en muchos aspectos de aplastante sentido común, el plantarse un

sistema energético alimentado exclusivamente por energías renovables, con un acceso universal a los recursos energéticos necesarios, y por tanto sin que la energía siga actuando de vehículo de las relaciones de poder en el planeta, y manteniendo la abismal separación entre ricos y pobres. Y estas sin duda son muy buenas noticias: no hay que seguir dirigiéndose de cabeza hacia el precipicio sin remedio alguno para la humanidad, hay otros modelos de desarrollo distinto al que hemos seguido los países ricos, que a diferencia del actual, sí que están al acceso del conjunto de la humanidad y tienen capacidad de proporcionarnos los servicios requeridos. Pero eso sí, para andar ese sendero hay que ir de la mano de la eficiencia, e implementar una serie de cambios estructurales en nuestros sistemas político, social y energético, sacudiéndonos el enquistamiento asociado a mantener durante tanto tiempo los mismos planteamientos, incluso para olvidar que otras opciones son posibles y más apropiadas.

Pero debemos estar dispuestos a seguir dejándonos sorprender por las escenas que nos desvelan los escenarios, pues a fin de cuentas, un escenario es tan solo capaz de desvelar aquellos aspectos que se propone cuantificar, y a medida que nos cuestionamos más aspectos de las condiciones de partida que nos han conducido a la situación actual, y a medida que incorporamos nuevos enfoques conceptuales a la resolución de los interrogantes que nos genera la encrucijada en la que nos encontramos, la cuantificación de estos elementos mediante la elaboración de un escenario puede ir descubriéndonos paisajes que a priori no se nos hubiera ocurrido considerar por considerarlos sin fundamento. En gran medida, esta es una de las funciones principales que ejercen los escenarios cuantificados: rescatar del baúl de los sueños ideas

¹⁶ En la situación límite actual está claro que la prioridad debe ser impulsar la eficiencia energética tanto como sea posible.

del futuro para pasarlas al plano de la realidad mediante la constatación, por medio de la cuantificación de sus implicaciones, de que no son menos factibles que la realidad actual que vivimos.

En los escenarios desarrollados en este estudio hemos querido seguir avanzando la luz por el sendero para explorar distintos paisajes:

- Para empezar, nuestros BAU, siguiendo la tendencia de internalización anteriormente comentada, y teniendo en cuenta que el ejercicio de la responsabilidad sobre la situación actual requiere que los países como España vayan abriendo camino, son bastante optimistas.
- Por otro lado, hemos querido explorar el potencial de la eficiencia, especialmente en los sectores difusos, más allá de lo considerado en los escenarios actuales, para comprobar hasta dónde podemos bajar ese listón del aporte de la eficiencia para cubrir la demanda BAU. En efecto, ya en los escenarios actuales, tal y como tenemos plasmado en los gráficos anteriores, resulta sorprendente¹⁷ desde la perspectiva de unos pocos años atrás, el potencial de las medidas de eficiencia. Pero, ¿hasta dónde podemos llegar bajando ese listón? Para responder a esta pregunta apurando en la precisión de la respuesta es preciso desarrollar escenarios detallados que vayan construyéndose desde abajo hacia arriba, es decir, partiendo de la demanda de servicios e introduciendo las tecnologías apropiadas para cubrirla para evaluar la demanda agregada a la que nos conducen: una metodología macro basada en correlaciones de la evolución pasada es incapaz de añadir luz sobre estos paisajes.

- Por último, hemos querido explorar también hasta cierto punto las opciones de implementar cambios en escalón en nuestro proceso evolutivo. Afortunadamente, tanto las tecnologías que ya tenemos accesibles, como los replanteamientos sobre la organización e interacciones entre los distintos sistemas en los que estamos organizados, nos abren la puerta a acceder a ciertos mecanismos de escalón en nuestro proceso evolutivo si tenemos el coraje de coger las riendas de los acontecimientos. Y dada la situación de urgencia a la que nos ha conducido nuestro continuismo e impasividad hasta la actualidad, probablemente esos mecanismos de cambio en escalón sean uno de los últimos salvavidas a los que nos podamos agarrar.

¹⁷ A raíz de esos resultados, para un extraterrestre que analizara la situación actual de nuestro planeta, lo realmente sorprendente sería que no hubiéramos iniciado ya hace tiempo el despliegue de este potencial de la eficiencia.



Planteamientos conceptuales

2



En este punto recogemos y elaboramos algunos de los conceptos que subyacen en el planteamiento de los escenarios y análisis desarrollados en este informe.

2.1 Sobre los límites del crecimiento

Un indicador fundamental de nuestro sistema económico es el Producto Interior Bruto (PIB)¹⁸. Con la estructura actual de nuestro sistema económico, se considera una condición fundamental para la “salud” del sistema económico el que se mantengan valores positivos del crecimiento anual del PIB¹⁹. Es decir, nuestro sistema económico no funciona correctamente si no se mantienen unas condiciones de crecimiento continuado del PIB.

Sin embargo, con la estructura actual de nuestro sistema económico²⁰, esta condición de crecimiento mantenido entra claramente en conflicto con las condiciones de contorno a las que se debe someter la actividad de nuestra sociedad mientras se limite al planeta Tierra. Es decir, la “salud” de nuestro sistema económico y la de nuestro planeta no puede coexistir, lo cual, sin duda, representa un grave problema además de un evidente signo de insostenibilidad. En efecto, la condición de mantener una tasa de crecimiento porcentual anual constante a lo largo del tiempo, matemáticamente equivale a tener un crecimiento exponencial del PIB con el tiempo, y en el contexto actual de nuestro sistema económico resulta incompatible mantener un crecimiento exponencial en un medio finito (planeta Tierra). En algún momento ese crecimiento exponencial conduce a alcanzar la capacidad de carga del planeta, y dada la inercia del sistema económico incluso nos lleva a sobrepasar esa capacidad de carga para sobreexplotar el medio²¹: la consecuencia, en cualquier

sistema ecológico donde se dan estas condiciones, es una situación de crisis aguda que conduce al exterminio de una gran parte de la población y a una gran reducción de la capacidad de carga del medio, para soportar una población muy inferior de esa especie.

La estructura actual de nuestro sistema económico se basa en la producción y venta de bienes de consumo, lo cual conduce a situaciones de gran ineficiencia, y limita mucho o incluso imposibilita su capacidad de reacción en situaciones de crisis. En efecto, el hecho de que la “salud” del sistema económico esté directamente relacionada con la venta de productos (coches, casas, etc.), en lugar de con la cobertura de los servicios que el usuario quiere satisfacer con esos productos (accesibilidad, confort, etc.) elimina del sistema las principales señales que permitan cubrir esos servicios de forma eficiente, y a menudo nos conducen a una situación de ineficiencia absoluta.

Consideremos por ejemplo el sector transporte particular. Actualmente en España tenemos ya demasiados vehículos que circulan y congestionan las infraestructuras viarias (del orden de ½ vehículo particular por habitante), lo cual, dada la baja eficiencia de estos vehículos, constituye uno de los principales problemas desde el punto de vista de las emisiones de GEI. La evolución del sistema transporte hacia la eficiencia requiere precisamente lo contrario a mantener esos niveles de ventas de vehículos, es decir, lo que requiere es usar los vehículos con factores de capacidad mucho más elevados a los actuales. Y las señales adecuadas del sistema económico para evolucionar hacia la eficiencia deberían ser que el beneficio de los fabricantes de vehículos estuviera directamente vinculado a la eficiencia de los vehículos, y no a la cantidad de los mismos vendidos como sucede en la actualidad. Pero en el contexto

18 Con la estructura actual del sistema económico, el PIB se evalúa de la siguiente forma: $PIB = C + I + G + (EX - IM)$ donde,

C = consumo privado
I = inversión privada
G = gasto gubernamental
EX = exportaciones de bienes y servicios
IM = importaciones de bienes y servicios.

19 Durante los últimos años, la mayoría de escenarios en nuestro entorno económico manejaban tasas de crecimiento anual del PIB del 3%/a. Las economías en transición mantienen valores incluso muy superiores a éste. En el contexto de crisis actual, a menudo se escuchan comentarios asociados a la incapacidad de la economía de crear empleo hasta que el crecimiento del PIB no alcance valores del orden del 2%/a.

20 La estructura actual de nuestro sistema económico se basa en la producción y venta de bienes de consumo, lo cual constituye una gran ineficiencia del sistema económico y limita mucho su capacidad de reacción en situaciones de crisis.

21 En términos de la huella ecológica (www.footprintnetwork.org) en torno al año 1976 fue cuando la humanidad en su conjunto sobrepasó la capacidad de carga del medio. En el año 2007 (WWF, GFN, ZLS, 2010) la humanidad en su conjunto requería ya de 1,5 planetas Tierra para soportar su huella ecológica (huella ecológica de 2,7 gha/hab con una biocapacidad del planeta de 1,8 gha/hab), con algunos países como los Emiratos Árabes y Catar con una huella por encima de 10 gha/hab, otros como Dinamarca, Bélgica, y EE. UU. con una huella del orden de 8 gha/hab, y España con una huella de 5,42 gha/hab (la gha se refiere a una hectárea global, que representa una hectárea de terreno con una productividad equivalente a la capacidad de producción media del total de área terrestre y marina biológicamente productiva). Con un escenario BAU moderado, para el año 2030 la humanidad requeriría ya del orden de dos planetas Tierra para soportar su huella ecológica, con una tendencia creciente, que llegará a sobrepasar las 2,25 tierras en el año 2050.

actual del sistema económico, las medidas de eficiencia nadan a contracorriente respecto a los requerimientos de “salud” económica del sector, por lo que su alcance se ve tremendamente limitado. La evidencia más apabullante de esta situación la vivimos a lo largo del año 2009 en nuestro país, en el que la situación de crisis del sistema económico que hemos atravesado ha hecho que los recursos económicos de la administración se invirtieran en proporcionar ayudas para mantener la estructura viciada del sistema económico, es decir, la venta de vehículos con bajos requerimientos de eficiencia, impulsando el modelo que está conduciendo a la crisis de nuestro sistema climático²², en lugar de invertir esos recursos escasos en la re-conversión del sistema económico.

Es decir, en el contexto actual no hay sitio para ambos: o mantenemos la “salud” del sistema económico, o mantenemos la “salud” del planeta. Y como hasta ahora la “salud” del sistema económico es percibida por el conjunto de la sociedad con tiempos de respuesta mucho más cortos y de forma mucho más directa, no hay lugar a dudas de cuál es la elección que tomamos: la “salud” del sistema económico. Pero esta “salud” también constituye una falacia, y nunca le podremos quitar las comillas, pues a la larga²³ nos conducirá a una situación de crisis económica mucho más profunda que la que hayamos experimentado hasta la fecha, marcada además por un elemento macroeconómico fundamental: la sobreexplotación de la capacidad del sistema en el que desarrollamos nuestra actividad.

Algo parecido sucede en el sector de la edificación, tan íntimamente relacionado con la situación de crisis económica que estamos atravesando. El mecanismo de mercado de este sector está basado exclusivamente en la venta de unidades de producto (edificios), en

lugar de en los servicios que el cliente quiere cubrir con esos edificios, por lo cual desaparece cualquier señal de mercado que impulse a que los edificios producidos resulten eficientes para cubrir los servicios que requiere el usuario²⁴.

A la vista de esta situación resulta conveniente explorar con un poco más de detalle las opciones e implicaciones de este prerrequisito de mantener un crecimiento relativo constante del PIB en nuestro sistema económico. De hecho, en el contexto de los enfoques macro para la elaboración de escenarios energéticos, el PIB es una de las variables independientes principales, cuando no la única, en la que se basan estos escenarios. Nosotros emplearemos en pocas ocasiones las aproximaciones macro para elaborar los escenarios, pero necesitamos elaborar un escenario de evolución del PIB para aquellos casos en que nos apoyemos en estas aproximaciones macro. Puesto que los escenarios de contracción, o incluso estancamiento del PIB, son difíciles de asimilar actualmente, y dado que para nuestros escenarios energéticos el efecto del escenario del PIB será relativamente limitado, hemos optado de forma conservadora por mantener un escenario BAU de PIB creciente, pero creemos que resulta interesante explorar las implicaciones de los escenarios de PIB eternamente crecientes para que empecemos a focalizar la imperiosa necesidad de reconvertir nuestro sistema económico alineándolo con los requerimientos de eficiencia y sostenibilidad en lugar de que siga evolucionado en dirección contraria.

La intensidad energética (definida como cociente entre el consumo de energía y el PIB) es el parámetro más relevante desde el punto de vista de la eficiencia energética de nuestro sistema económico y, en la actualidad, es sobre el que se centran los esfuerzos para reducir el

²² Podemos escuchar justificaciones por el lado de la administración que apuntan a que los nuevos vehículos vendidos gracias a estos apoyos son más eficientes que aquellos a los que sustituyen, por lo que se reducen las emisiones de GEI, lo cual podría ser “localmente” cierto en algunos casos (aunque dudoso en otros dado el elevado valor del límite de emisiones que se estableció: 149 g CO₂/km), pero constituye una falacia a nivel global, pues mantiene vivo el mecanismo de mercado que conduce a que el número de vehículos siga aumentando y con ellos el nivel global de emisiones.

²³ Este “a la larga” no está tan lejano como sugiere la expresión, pues ya lo estamos empezando a experimentar. Pero en el contexto en el que se toman las decisiones políticas y en el que la sociedad experimenta las “urgencias” de cambio, sí que sigue quedando en un segundo plano.

²⁴ En (García Casals, X., 2009) se pueden encontrar ejemplos de modelos de negocio para el sector transporte y el de la edificación, en los que se muestra cómo podría estructurarse el sistema económico para evolucionar hacia una economía basada en prestaciones, en la cual la generación de beneficio quedara directamente vinculada a la eficiencia en lugar de al despilfarrar.

impacto energético del sistema económico, buscando desacoplar el crecimiento económico del crecimiento en el consumo de energía.

Las mejoras²⁵ en intensidad energética acotan el crecimiento de la demanda con un PIB creciente. En efecto, tal y como nos muestra la siguiente expresión, para un valor dado del crecimiento económico ($\Delta\text{PIB}/\text{PIB}$), las reducciones en la intensidad energética ($\Delta(\text{PIB}/E) > 0$) atenúan el crecimiento del consumo de energía ($\Delta E/E$):

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\text{PIB}}{\text{PIB}} - \frac{\Delta\left(\frac{\text{PIB}}{E}\right)}{\frac{\text{PIB}}{E}}$$

Pero realmente se podría acotar mucho más, llegando a invertirlo, el crecimiento de la demanda energía si se anulara el crecimiento del PIB ($\Delta\text{PIB} = 0$), tal y como nos muestra la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\text{PIB}}{\text{PIB}} - \frac{\Delta\left(\frac{\text{PIB}}{E}\right)}{\frac{\text{PIB}}{E}} = - \frac{\Delta\left(\frac{\text{PIB}}{E}\right)}{\frac{\text{PIB}}{E}}$$

En efecto, en esta situación, toda mejora en la intensidad energética se invierte directamente en una reducción del consumo de energía en lugar de simplemente en “atenuar” el crecimiento de dicho consumo.

Sin embargo, en la mayoría de escenarios energéticos que se elaboran en la actualidad, incluso los que podríamos calificar como alternativos a los enfoques BAU, se siguen manteniendo tasas constantes de crecimiento del PIB como una de las hipótesis de partida fundamentales. Como ejemplo podemos citar (Arjun Makhijani, 2008), en el que se plantea la posibilidad de eliminar el uso de combustibles

fósiles y nucleares en EE. UU. mediante el desarrollo de escenarios para el año 2050. En esta referencia se plantea un escenario de crecimiento exponencial del PIB con una tasa anual constante del 3%/a, cuyos efectos energéticos se atenúan con un escenario de mejora exponencial de la intensidad energética, con una tasa anual constante de 2%/a. Es decir:

$$\frac{\Delta\left(\frac{\text{PIB}}{E}\right)}{\frac{\text{PIB}}{E}} = 0.02 \quad ; \quad \frac{\Delta\text{PIB}}{\text{PIB}} = 0.03$$

En estas condiciones, el crecimiento del consumo de energía también resulta ser exponencial, pero a una tasa del 1%/a en lugar de al 3%/a que hubiera resultado en ausencia de la mejora en intensidad energética, pero básicamente sigue siendo un crecimiento exponencial del consumo de energía:

$$\frac{\Delta E}{E} = 0.01$$

Otros ejemplos de escenarios energéticos recientes que incorporan tasas de crecimiento constante del PIB son los de (AIE, 2007), que a la vez son los empleados en (EREC, Greenpeace, 2008), y que para el conjunto del mundo tomaban $\Delta\text{PIB}/\text{PIB} = 3,3\%/a$, mientras para Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico Europa (OCDE) asumen $\Delta\text{PIB}/\text{PIB} = 1,7\%/a$ ²⁶.

Básicamente, entendemos que esta situación es debida a la necesidad de mantener un enfoque conservador en este punto del desarrollo de los escenarios, para no perder opciones de entrar en el debate de fondo en otros aspectos, como pueda ser la viabilidad de cubrir toda la demanda energética con energías renovables. Pero en algún momento

²⁵ Una mejora de la intensidad energética es una reducción de la misma, es decir, una reducción de la cantidad de energía necesaria por unidad de PIB.

²⁶ En (EREC, Greenpeace, 2010) cuyo escenario de referencia coincide con el WEO 2009 de la AIE extrapolado de 2030 a 2050, y donde el escenario de crecimiento económico es común tanto para los escenarios BAU como para los eficientes (al igual que en este estudio), las tasas anuales medias de crecimiento del PIB son del 3,39%/a a nivel mundial y del 1,37%/a a nivel de OCDE-Europa.

deberemos afrontar esta contradicción intrínseca del crecimiento exponencial en un medio finito, para plantearnos que ya nos hemos hecho mayores, y que ahora se trata de mantener las posibilidades de bienestar de las generaciones futuras, para lo cual será preciso reestructurar nuestro sistema económico para alinearlo con este objetivo básico.

A nivel mundial, el PIB ha crecido de media $\Delta \text{PIB}/\text{PIB} = 3,3\%/a$ desde 1971 al 2002, y este crecimiento ha ido acompañado por un crecimiento de la demanda de energía primaria de $1,98\%/a$ (por cada 1% de PIB, la demanda energía ha crecido $0,6\%$). Es decir, en este periodo hemos tenido una mejora media de la intensidad energética de $\Delta(\text{PIB}/E)/(\text{PIB}/E) = 1,32\%/a$.

De IMF (2008) podemos extraer un poco más de información de la evolución histórica reciente y proyecciones a corto plazo para algunos países de nuestro entorno, que recogemos en las figuras 12 y 13. Como podemos observar, la tendencia media en todos estos países ha sido al crecimiento, si bien las tasas

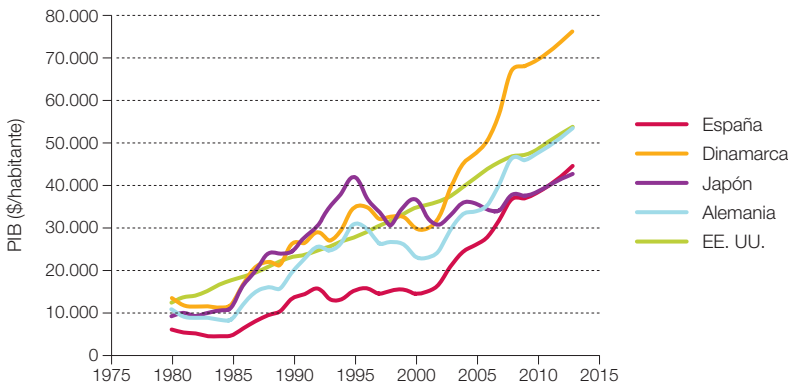
anuales de crecimiento han ido experimentando importantes fluctuaciones.

Pero analicemos con un poco más de detalle cuáles son las implicaciones de esta hipótesis de crecimiento exponencial sostenido:

Consideremos, en primer lugar, las tasas constantes de incremento del PIB ($3\%/a$) y de mejora de la intensidad energética ($2\%/a$) planteadas en (Arjun Makhijani, 2008), y analicemos sus repercusiones sobre las posibilidades de cubrir toda la demanda con energías renovables en España.

En los estudios de *Renovables 2050* (GP, 2005) y *Renovables 100%* (GP, 2007) se analizó la viabilidad técnica de cubrir la demanda de energía en la España peninsular, con energías renovables en un escenario para el año 2050, para concluir que el potencial disponible permitía cubrir hasta 56 veces la demanda de energía eléctrica y 10 veces la demanda de energía total en el año 2050. En este contexto de abundancia de recurso renovable²⁷, consideramos como un buen indicador de los

Figura 12. Evolución histórica del PIB (US \$; precios corrientes) per cápita en algunos países, elaborado a partir de datos (IMF, 2008).



²⁷ Debemos tener en cuenta, sin embargo, que la explotación de todo este recurso de energía renovable requiere emplear una gran superficie de ocupación del territorio, tanto para la generación como para el transporte y distribución de esta energía, por lo que tanto desde esta perspectiva como desde la perspectiva de los costes del sistema energético, no resulta recomendable explotar todo este potencial.

Figura 13. Tasas de crecimiento anual históricas del PIB (precios constantes) en algunos países, elaborado a partir de datos (IMF, 2008).

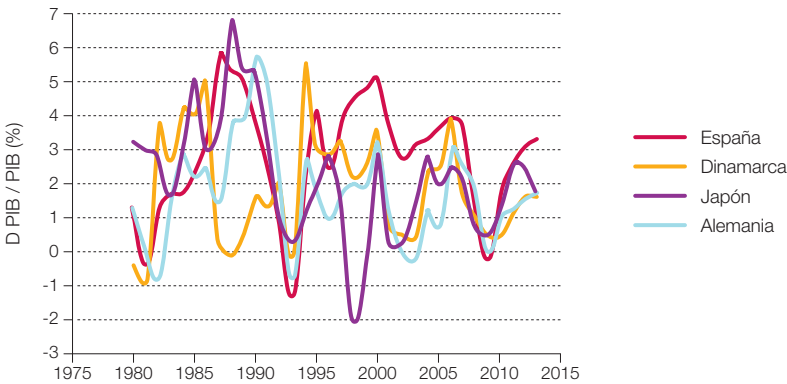
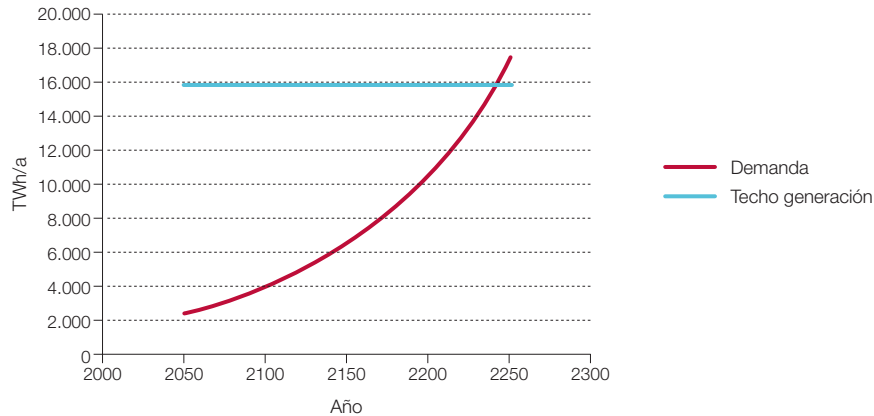


Figura 14. Evolución de la demanda energética total de la España peninsular, en relación al potencial de recurso renovable disponible, en un escenario de crecimiento del 3%/a del PIB y mejora del 2%/a de la intensidad energética, partiendo del punto final del escenario desarrollado en (GP, 2005).



límites del crecimiento la medida de la demanda de energía en términos relativos al potencial disponible.

Partiendo, por tanto, de una demanda de energía total en 2050 en términos eléctricos²⁸ de 2.381 TWh/a, un escenario que mantuviera las tasas de crecimiento del PIB y de la

mejora de la intensidad energética planteadas en (Arjun Makhijani, 2008) a partir del año 2050, nos conduciría a una evolución del crecimiento de la demanda energética en relación al potencial disponible, a partir de fuentes renovables como el indicado en la figura 14, para conducir a un agotamiento del recurso renovable disponible en torno al año 2240.

28 En unas condiciones parecidas a las supuestas en (GP, 2007), pero adaptando la población al nuevo escenario de población en 2050, mejorando el rendimiento eléctrico-térmico hasta 160% (desde el 90%) por la incorporación de bombas de calor (más acorde con el planteamiento de la cobertura de la demanda térmica que hacemos en este informe), y adaptando los porcentajes de la parte de demanda no eléctrica a 55% - 45% en térmico-transporte (era 60%-40%) para ajustar la participación del transporte en los balances energéticos empleados como punto de partida en este estudio. En estas condiciones, los valores de partida en 2050 son 1943 TWh/a de energía final (frente los 1525 TWh/a de R100%), y 2381 TWh/a de demanda total eléctrica (frente a los 2142 TWh/a de R100%).

Figura 15. Evolución de la demanda energética total de la España peninsular, en relación al potencial de recurso renovable disponible, en un escenario de crecimiento del 1%/a del PIB y mejora del 0.67%/a de la intensidad energética, partiendo del punto final del escenario desarrollado en (GP, 2005)

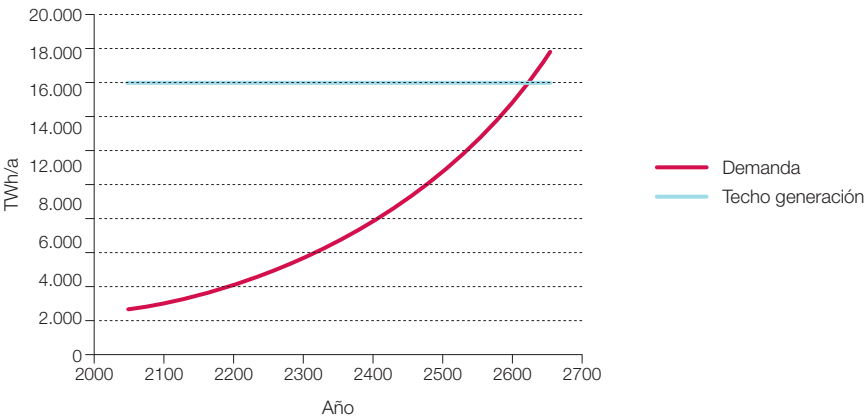
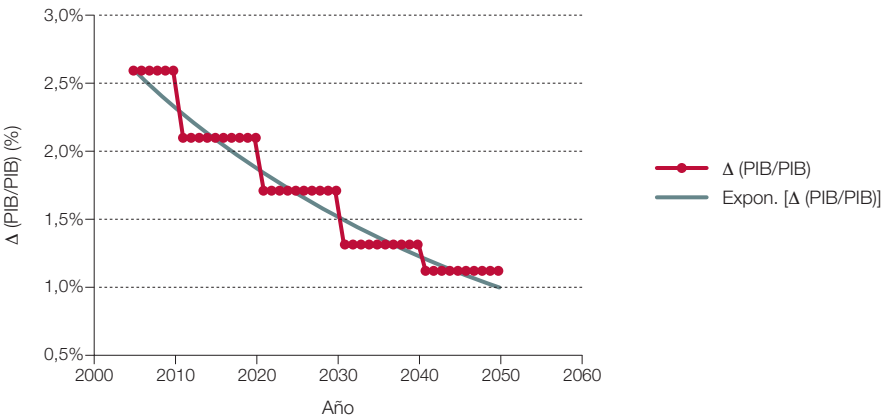


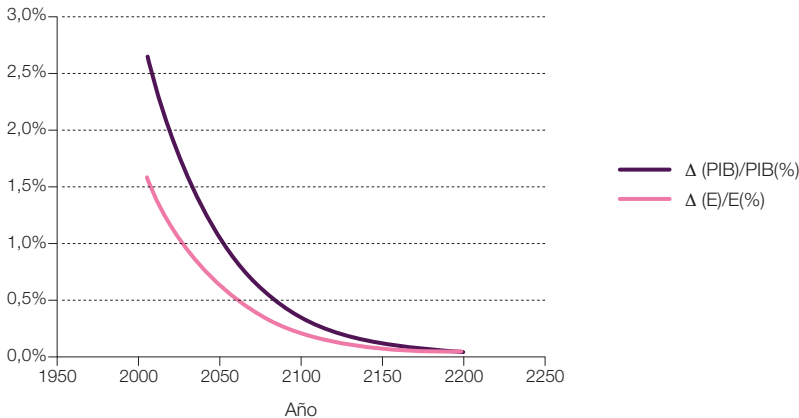
Figura 16. Tasas de crecimiento anual del PIB (precios constantes) supuestas en los escenarios (AIE, 2007) y (EREC, Greenpeace, 2008), junto a un ajuste exponencial de las mismas.



Incluso si suponemos un menor crecimiento del PIB del 1%/a, con la misma relación de la mejora de intensidad energética al crecimiento del PIB que en (Arjun Makhijani, 2008), la situación sería tal que en el año 2618 agotaría-

mos el recurso renovable disponible (figura 15), cuando al sol todavía le quedarían 5.000 millones de años de vida, lo cual indica una clara insostenibilidad del modelo de desarrollo basado en los crecimientos exponenciales.

Figura 17. Tasas de crecimiento anual del PIB y de la demanda de energía para OCDE-Europa extrapoladas más allá del año 2050 a partir del ajuste exponencial de los escenarios (AIE, 2007) y (EREC, Greenpeace, 2008) hasta el año 2050.



Por tanto, en cualquier contexto de sostenibilidad, parece imprescindible plantearse una saturación, aunque sea a largo plazo, del crecimiento del PIB. Con el fin de plantear esta saturación bajo un contexto BAU, hemos partido de los escenarios del PIB presentados en el WEO de la AIE (AIE, 2007) para OCDE-Europa²⁹ hasta el año 2030, y extrapolados por (EREC, Greenpeace, 2008) hasta el año 2050. En la figura 16 mostramos este escenario de las tasas de crecimiento del PIB asociadas a este escenario de la AIE, así como un ajuste exponencial de las mismas. Como podemos observar, realmente el planteamiento BAU de la AIE ya constituye un planteamiento de contracción en el crecimiento económico, de tal forma que si extrapolamos dicho escenario más allá del horizonte considerado, nos conduce eventualmente a una saturación del crecimiento y estancamiento del PIB.

Procediendo a extrapolar el ajuste exponencial del escenario de crecimiento económico de la AIE, y considerando que se mantiene el ratio histórico entre la tasa de crecimiento del

PIB ($\Delta\text{PIB}/\text{PIB}$) y del consumo de energía ($\Delta E/E$), alcanzaríamos una estabilización del crecimiento del PIB y de la demanda de energía en torno al año 2200 tal y como nos muestra la figura 17:

A pesar de la convergencia planteada por este escenario a largo plazo, las tasas de crecimiento económico hasta 2050 son elevadas, lo que conduce a un crecimiento absoluto de la economía que incluso parece dudoso en el contexto actual. En la figura 18 presentamos las tasas anuales (TA) y tasas anuales equivalentes³⁰ (TAE) de crecimiento del PIB en el escenario hasta el año 2050. La TAE resultante hasta 2050 es de 1,68%/a que implica un crecimiento del PIB respecto al actual del 98% (prácticamente doblar el PIB actual).

De hecho, este escenario conduce a un importante crecimiento del PIB hasta el año 2050, periodo en el que prácticamente no se aprecian las tendencias de contracción del crecimiento (figura 19). Es preciso extender

²⁹ Tanto en el WEO de la AIE como en el EREC (Greenpeace, 2008) no aparece un tratamiento específico de España. Por ese motivo empleamos los valores de OCDE-Europa como los más cercanos a nuestra realidad económica de cara a la elaboración de los escenarios preliminares de este apartado.

³⁰ La TAE es una tasa de crecimiento anual que al mantenerla constante en el periodo de tiempo considerado conduce a una evolución equivalente a la experimentada con la tasa anual (TA) variable año a año.

Figura 18. TA y TAE del PIB en el escenario de la AIE (y adoptado en este estudio) hasta el año 2050.

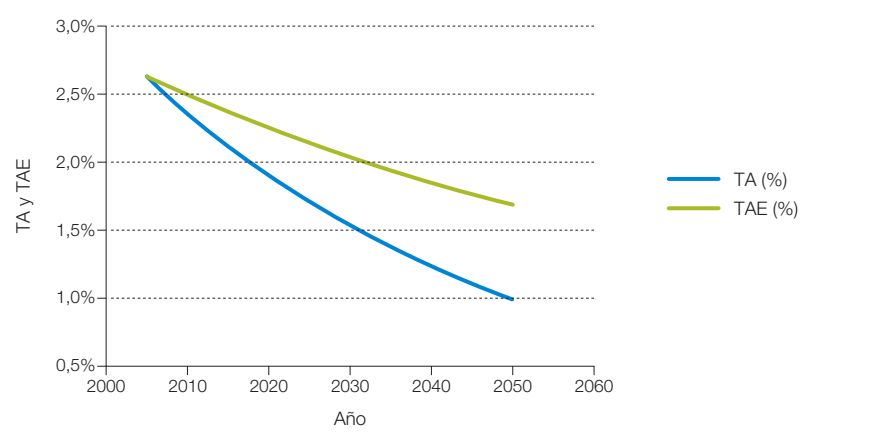
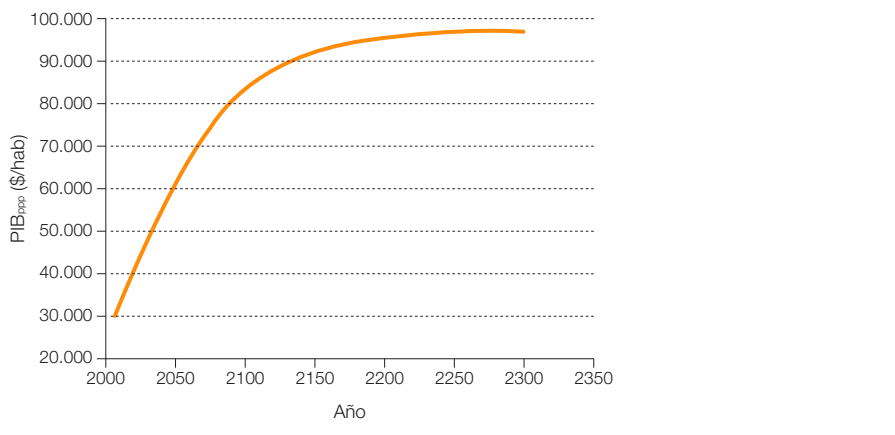


Figura 19. Escenario adoptado de crecimiento del PIB (precios constantes), extendido más allá del límite temporal considerado en este estudio (año 2050) para apreciar su tendencia de contracción y saturación.



significativamente el plazo temporal para empezar a apreciar la contracción del crecimiento en el escenario planteado. El valor final de saturación del PIB en el escenario planteado, del orden de 96.000 \$/hab parece realmente elevado a la luz del contexto de crisis actual³¹, y hace pensar que las tasas de crecimiento del PIB que realmente cabe esperar sean sensiblemente inferiores a las que

se deducen de la extrapolación del escenario de la AIE, habida cuenta de los claros signos de contracción y convergencia que actualmente muestra la situación del mundo, desde los puntos de vista social, político y medio ambiental. A pesar de todo, de forma conservadora³² vamos a asumir este escenario de crecimiento económico para el desarrollo de este estudio.

31 Este PIB es del orden del actual en las economías de mayor PIB del mundo (Luxemburgo).
32 Conservador en el sentido de que una mayor contracción del crecimiento económico conducirá a una menor demanda de energía.

Con este escenario de crecimiento del PIB, y considerando que se mantiene el ratio histórico entre la tasa de crecimiento del PIB ($\Delta\text{PIB}/\text{PIB}$) y del consumo de energía ($\Delta E/E$), la demanda de energía en nuestro país podría cubrirse sobradamente³³ con el recurso de energías renovables disponible.

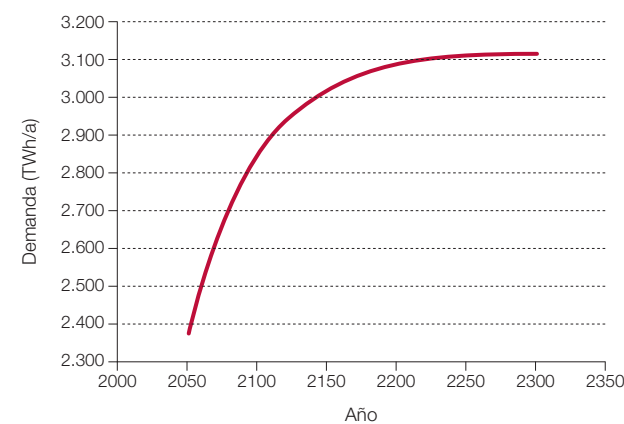
En efecto, en estas condiciones, la evolución de la demanda de energía total en términos eléctricos³⁴ a partir del año 2050³⁵ sería la mostrada en la figura 20, que como vemos conduce a una saturación de la demanda de energía en torno al año 2300, manteniendo el% del uso del potencial de generación por debajo del 20% tal y como nos muestra la figura 21.

Por tanto, vemos que ante un planteamiento de saturación del crecimiento económico compatible con los escenarios actuales de la AIE, los recursos renovables de los que disponemos en nuestro país tienen capacidad suficiente para mantener de forma sostenible

nuestra actividad económica. Sin embargo, para alcanzar esta sostenibilidad, es preciso afrontar abiertamente el hecho de que, aunque sea más allá del año 2050, resulta imprescindible que las tasas de crecimiento económico se acaben anulando, y por tanto, será preciso trabajar en la estructura de nuestro sistema económico para que esta situación de crecimiento nulo estable no suponga el desencadenamiento de una situación de crisis crónica.

Por otro lado, también debemos tener presente que esta sostenibilidad local, en lo que se refiere a la disponibilidad de recursos renovables en nuestro país, no tiene porqué estar asociada a una sostenibilidad global. En este sentido, consideramos que en la actualidad ya se dan indicios suficientes de la imperiosa necesidad de convergencia entre las distintas economías del planeta, para pensar que la estabilización de nuestra economía debería producirse en plazos más cortos y

Figura 20. Escenario de evolución de la demanda de energía en la España peninsular más allá del año 2050, partiendo del resultado adaptado del informe Renovables 100%, y consecuente con el escenario de evolución del PIB anteriormente presentado y bajo la hipótesis de que se mantiene constante la relación entre la tasa histórica anual de crecimiento del PIB y la de la demanda de energía.

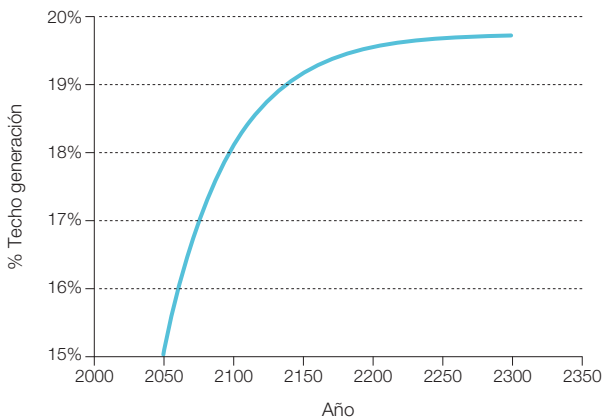


33 Este escenario de demanda energética proyectado más allá del periodo de análisis de este estudio es una estimación preliminar basada en el mantenimiento de la relación entre las tasas anuales de crecimiento relativo del PIB, y de la demanda de energía. A lo largo de este informe afinaremos más sobre el escenario de crecimiento de la demanda energética hasta el año 2050, para explorar el potencial de las medidas de ahorro y eficiencia, con el objetivo final de poder cubrir el total de la demanda usando una cantidad menor de recursos energéticos renovables, y a un menor coste del sistema energético.

34 En unas condiciones parecidas a las supuestas en (GP, 2007), pero adaptando la población al nuevo escenario de población en 2050, mejorando el rendimiento eléctrico-térmico hasta 160% (desde el 90%) para reflejar la mayor participación de bombas de calor, y adaptando porcentajes de la parte de demanda no eléctrica a 55% - 45% en térmico-transporte (era 60%-40%) para ajustar la participación del transporte en 2006. En estas condiciones, los valores de partida en 2050 son 1943 TWh/a de energía final (frente los 1525 TWh/a de R100%), y 2381 TWh/a de demanda total eléctrica (frente a los 2142 TWh/a de R100%).

35 Partiendo del valor correspondiente a la demanda de energía en el año 2050 obtenido del estudio de *Renovables 100%* como se ha indicado anteriormente.

Figura 21. Porcentaje del recurso disponible de energías renovables en la España peninsular según (GP, 2005), necesario para cubrir la demanda de energía en el escenario anteriormente expuesto.



en valores inferiores del PIB asintótico, lo cual implicaría plantearse escenarios con menores tasas de crecimiento anual del PIB de los aquí adoptados, y por tanto, el reconvertir más rápidamente nuestro sistema económico para que la situación de crecimiento nulo del PIB no nos conduzca a episodios de crisis³⁶. En efecto, el plazo temporal del año 2300 para estabilizar la demanda energética de nuestro país que nos proporcionan estos escenarios, parece ser totalmente incompatible con el requerimiento del sistema climático de alcanzar un máximo en las emisiones de GEI a nivel mundial para el año 2015. En este sentido resulta necesario empezar a articular cuanto antes los cambios en escalón que permitan pasar de mantener estas tasas de crecimiento anual positivas en la demanda energética, a unas tasas negativas (decrecimiento) en el menor plazo de tiempo posible, y en paralelo proceder a una introducción acelerada de generación renovable en el sistema energético para conseguir alcanzar ese pico de emisiones en el corto plazo de tiempo disponible.

2.2 Integración

Tradicionalmente hay una fuerte tendencia a enfocar los análisis relativos al cambio del modelo energético desde un punto de vista excesivamente sectorial dentro del sistema energético, y sin trascender a otros sistemas de nuestro modelo de organización. En el contexto actual, estos enfoques tan parciales no tienen ya capacidad de producir la velocidad de cambio requerida (opciones muy bajas de generar cambios en escalón), por lo que es preciso analizar el problema desde un punto de vista integral dentro del sector energético, y liberando mecanismos dentro de otros sistemas distintos a los de ámbito técnico, como el propio sistema económico. Y en este contexto, soluciones que parecían ser las óptimas dentro del alcance del enfoque sectorial parcial, pueden dejar de estar en el centro de atención para abrir paso a otras soluciones con un potencial de cambio muy superior.

Estos planteamientos de integración intersectorial y entre los distintos sistemas de nuestro modelo de organización, requieren

³⁶ En este sentido, el episodio de crisis vivido en los años 2008-2010 en el que se anuló (o incluso invirtió) la tasa anual de crecimiento del PIB en nuestro país, es una clara indicación de la inmadurez de nuestro sistema económico para afrontar los requerimientos de la sostenibilidad.

como característica diferencial el liberar el atributo de *inteligencia global* como denominador común subyaciendo en la estructura de todos los sistemas en los que estructuramos nuestro modelo de organización y desarrollo. Así, vamos a tener que rodearnos rápidamente de edificios inteligentes, redes eléctricas inteligentes, sistemas de transporte inteligentes, etc., pero también de sistemas económicos inteligentes, sistemas sociales inteligentes y sistemas políticos inteligentes. La velocidad de cambio del sistema menos inteligente será la que marcará la velocidad de cambio global que como sociedad podemos desarrollar: por tanto no debemos descuidar ninguno de ellos en su evolución hacia la inteligencia, por mucho que en la actualidad nos resulte mucho más auto reconfortante y satisfaga más nuestro ego el limitarnos a hablar de sistemas técnicos inteligentes.

Dentro del propio sistema energético, la integración pasa por un lado por la electrificación de los distintos sectores, de tal forma que al compartir el vector energético principal se puede sacar provecho de las sinergias entre los distintos sectores y de la capacidad de valorizar esa electricidad “residual” procedente de fuentes renovables que se genera como consecuencia de los requerimientos de regulación al plantearnos un sistema eléctrico alimentado al 100% con fuentes de energía renovable (GP, 2007). Esta electrificación también evita en gran medida el requerimiento de duplicidad de infraestructuras energéticas, cuando disponemos de tecnología capaz de proporcionar los mismos servicios con niveles de eficiencia comparables o superiores mediante el vector electricidad. Por último, esta integración vía electrificación nos ofrece en sí misma la opción de acceder a uno de los principales elementos de evolución en escalón, al impulsar la evolución hacia la eficiencia e integración de renovables de algunos de los

sectores energéticos dominantes (como edificación y transporte) mucho más allá de lo que permitiría su evolución tendencial.

Y por otro lado la integración dentro del sector energético pasa por la incorporación de la demanda en la operación del sistema como uno de sus componentes principales, para romper el planteamiento BAU de gestionar y gobernar la operación de estos sistemas exclusivamente desde el lado de la oferta, para lo cual, el despliegue de inteligencia por el sistema energético y por el sistema económico constituye uno de los requisitos fundamentales.

2.3 Evolución en escalón

Si observamos con perspectiva la situación actual, tanto a nivel nacional como global, la evolución pasada, las restricciones que nos impone el sistema climático, y la capacidad de cambio que demuestran nuestros políticos, no podemos sino llegar a la conclusión de que a estas alturas requerimos introducir modificaciones estructurales para facilitar una evolución en escalón (discontinuidad en la derivada evolutiva): en efecto, la urgencia de cambio ya no da para evoluciones continuas en derivada, la opción de ir por esta vía caducó con nuestra inactividad en el pasado.

Sin embargo, tal y como analizaremos en este trabajo, disponemos de herramientas para acometer esta evolución discontinua. La reestructuración de los sistemas que forman la base de nuestra sociedad, libera mecanismos que permiten alcanzar una discontinuidad en la derivada evolutiva sin implicar esfuerzos fuera del alcance. Pero realmente necesitamos ya acometer este proceso de cambio en los países en los que hemos basado nuestro desarrollo en los modelos anteriores, para que la nueva línea de evolución atraiga a las economías emergentes,

antes de que se hipotequen durante los próximos 50 años en la potenciación exponencial de la senda equivocada que nos ha conducido a la situación actual.

Y realmente es una suerte que tanto la evolución de la tecnología, como la baja integración hasta la fecha entre los sistemas en que estamos organizados, así como la ausencia de orientación a objetivos globales en los mismos, nos brinden el potencial de articular mecanismos de respuesta rápida que conduzcan a evoluciones en escalón. De no ser por esta opción, el panorama actual sería realmente deprimente, pues la evolución tendencial nos conduciría de cabeza al precipicio sin ninguna opción de evitarlo.

La incorporación de inteligencia, tanto en el sistema energético como en los sistemas económico y político, constituye el ingrediente fundamental para activar estos cambios en escalón, y afortunadamente tanto desde el punto de vista tecnológico como desde una perspectiva sociológica ya estamos completamente capacitados para desplegar el atributo de inteligencia en nuestros sistemas: la ausencia actual de inteligencia en ellos es tan grande que nos proporciona un gran margen de mejora.

Esta inteligencia adicional proporciona la capacidad de explotar grados de libertad adicionales del sistema energético que hasta la fecha no han entrado en juego, configurando así estos mecanismos de respuesta rápida que conducen a cambios en escalón. Uno de estos grados de libertad adicionales sin duda lo constituye la participación activa de la demanda en la operación y gestión del sistema energético, proporcionando un gran incremento en la flexibilidad del sistema, lo cual constituye un atributo imprescindible para la integración eficiente de la generación

procedente de energías renovables, y conduce hacia una democratización del sistema energético con un gran potencial de expansión a otras regiones del planeta en cortos periodos de tiempo.

2.4 Mecanismos de respuesta rápida

Es curioso observar la distinta atención que prestamos a los procesos de realimentación rápida y realimentación lenta en los grandes problemas que nos afectan. Si tomamos como ejemplo la problemática asociada al cambio climático e insostenibilidad de nuestra sociedad, hay dos procesos relacionados que merecen nuestra atención:

Por un lado está la respuesta del sistema climático, a la cual dedicamos importantes esfuerzos de modelado. Sin embargo, en los modelos que actualmente usamos no se encuentran implementados los procesos de realimentación climática lenta (como el derretimiento de la capa de hielo de Groenlandia o la liberación de carbono del permafrost). Implícitamente hemos asumido que estos procesos de realimentación lenta tienen tiempos de respuesta superiores a lo que nos va a llevar recondicionar las concentraciones atmosféricas de CO₂-eq hacia valores seguros, por lo que pretendemos basar los acuerdos internacionales sobre las necesidades de reducción de emisiones en modelos que no incorporan estos mecanismos físicos. Sin embargo, el sistema climático ha avanzado la manifestación de sus mecanismos de realimentación lenta del orden de 80 años respecto a lo que pronosticaban nuestros modelos, para hacer evidente que el cambio climático está aconteciendo a velocidad muy superior a la que pronosticaban los modelos del IPCC en su informe del año 2007 y basándose en los que se estableció el punto

de partida³⁷ de la mesa de negociaciones del COP15 en Copenhague.

Por otro lado se encuentra la estructura básica de nuestro sistema económico, basada en la venta de productos en lugar de en proporcionar servicios, y metido en una vorágine de crecimiento ilimitado intrínsecamente insostenible. Es decir, un sistema económico con un fundamento radicalmente opuesto a la sostenibilidad, y con una fuerza destructora muy superior a la de todas las medidas paliativas que podamos probar de introducir. En estas condiciones, en lugar de apostar por mecanismos de respuesta rápida (como la reestructuración del sistema económico para basarlo en prestaciones energéticas), nos centramos exclusivamente en la aplicación de mecanismos de realimentación lenta, como los procesos de certificación energética de los edificios, que en el mejor de los casos³⁸ producirán un efecto significativo en tiempos del orden de 100 años, superior al plazo del que disponemos para resolver el problema. De hecho, cuando nos enfrentamos a un periodo de crisis como el que se desencadenó en el año 2008, las respuestas desde el lado de los sistemas político y administrativo se dirigen exclusivamente a inyectar suero a los mecanismos básicos del modelo económico que nos ha conducido a la situación actual, en lugar de impulsar el cambio necesario.

Para potenciar la transición desde la situación actual a un contexto de eficiencia con un sistema energético descarbonizado, en los plazos de tiempo disponibles y con capacidad de exportar a tiempo este modelo energético a las economías emergentes, que dominarán las emisiones de GEI en unos pocos años, resulta imprescindible que activemos mecanismos de cambio de respuesta rápida. Afortunadamente para nosotros todavía contamos con este as en la manga, pero no podemos postergar por más tiempo su puesta en escena.

Mecanismos de respuesta rápida son por ejemplo los asociados a activar un cambio en la estructura del sistema económico para pasar de vincular directamente el nivel de beneficio con el de despilfarro a vincularlo con el de ahorro. La activación de estos cambios de rumbo en el sistema económico no requiere más que de una modificación de las reglas de juego puesta en escena por la emisión de las señales de precios e incentivo adecuados.

El despliegue de inteligencia por los sistemas técnicos, si va acompañado del correspondiente despegue de inteligencia en los sistemas político y administrativo para permitirle desarrollar todo su potencial, en lugar de ponerle barreras, también libera una gran cantidad de mecanismos de respuesta rápida, que se pueden realimentar sinérgicamente con un sistema económico inteligente para darle la vuelta radicalmente al panorama de nuestro sistema energético.

Estos mecanismos de respuesta rápida están al alcance de la mano, pero probablemente, dado el grado de madurez de los sistemas político y administrativo, requieran de un empujón decisivo por parte del sistema social para activarlos, y hacer que los sistemas político y administrativo asuman sus responsabilidades en este proceso.

2.5 Transición hacia la era de la inteligencia

Por curioso que parezca, solo muy recientemente hemos empezado a oír hablar de la “inteligencia” como un componente diferencial de algunos de nuestros sistemas, cuya incorporación se percibe como un paso fundamental para conseguir mantenernos dentro de las condiciones de contorno que nos impone nuestro sistema climático.

³⁷ Desafortunadamente, el resultado del COP15 en Copenhague quedó incluso muy por debajo de los requerimientos de estos puntos de partida, lo que retrasó una vez más la adopción de medidas consistentes con la evidencia científica, dificultando todavía más la resolución de la problemática planteada como consecuencia de los retrasos adicionales.

³⁸ Es decir, en el caso de que estén bien implementados y consigan tirar del mercado en la dirección deseada, lo cual no siempre es el caso.

A lo largo de la historia de la humanidad, los sistemas que hemos ido articulando han estado gobernados por componentes, por lo general, bastante distantes del concepto de inteligencia colectiva o global que ahora empezamos a ver despuntar. Mientras el impacto de la especie humana se ha encontrado bien por debajo de la capacidad de carga del planeta, esta ausencia de inteligencia no ha trascendido a nivel global³⁹, por lo que ha sido sistemáticamente desplazada⁴⁰. Pero en la situación actual, en la que nuestra actividad ha sobrepasado rápida y claramente la capacidad de carga del sistema terrestre, ha surgido una gran urgencia por recurrir a esta inteligencia como una de las pocas tablas de salvación a las que todavía nos podemos agarrar.

Sin embargo, no se nos debe escapar el enfoque parcial que se está dando a esta característica de inteligencia, curiosamente limitando su alcance al de los sistemas técnicos desarrollados por el ser humano: redes eléctricas inteligentes, sistemas de transporte inteligentes, edificios inteligentes... Bien es cierto que es en la actualidad cuando se han liberado a gran escala las tecnologías capaces de introducir inteligencia en nuestros sistemas técnicos, pero ello no nos debe cegar en relación al alcance necesario de la incorporación de inteligencia en nuestros sistemas si queremos que con ello seamos capaces de producir el cambio necesario en el corto plazo de tiempo disponible.

En efecto, el alcance de la incorporación de inteligencia debería extenderse al conjunto de nuestros sistemas:

- Sistema político.
- Sistema administrativo.
- Sistema social.
- Sistema económico.

- Sistemas técnicos (red eléctrica inteligente, sistema de transporte inteligente, edificios inteligentes...).

Y es precisamente dentro de algunos de estos sistemas, distintos a los sistemas técnicos, donde reside el mayor potencial de producir cambios en escalón que permitan apartar suficientemente nuestra trayectoria evolutiva de los escenarios BAU.

No debemos perder de vista que sin la necesaria incorporación de inteligencia en el sistema político y en el sistema administrativo, no será posible materializar el potencial de cambio que nos brinda la incorporación de inteligencia en los otros sistemas. Y en este sentido, madurez y responsabilidad son los primeros síntomas de inteligencia global que se deben internalizar.

Asimismo, tampoco debemos dejarnos engañar por el espejismo de que basta con incorporar la inteligencia en los sistemas técnicos: sin una incorporación de inteligencia en el sistema económico y social, la mayoría de los beneficios de la incorporación de inteligencia en los sistemas técnicos quedarán fuera de nuestro alcance.

El contexto E3.0 descansa fuertemente sobre esta incorporación de inteligencia en todos los sistemas y en sus interacciones, pues es precisamente aquí donde reside uno de los mayores potenciales de implementar cambios en escalón sobre la evolución BAU. Sin embargo, dada la naturaleza del alcance del estudio que se encuentra centrado en el sistema energético, el mayor esfuerzo se va a centrar en analizar el potencial de los elementos técnicos para desarrollar el cambio requerido, presuponiendo que el resto de sistemas acompañan y guían el desarrollo de los sistemas técnicos.

³⁹ Si bien a nivel local siempre se han dejado sentir los efectos de esta falta de inteligencia.

⁴⁰ En este sentido, resulta bastante indicativo y acertado el título de la película que se estrenó en septiembre de 2008 describiendo cómo en 2055 un superviviente de la catástrofe climática planetaria analiza qué es lo que estaba pasando en la Tierra en el año 2008: "The Age of Stupid"

Pasamos a continuación a comentar algunos aspectos relevantes en relación a las distintas dimensiones involucradas en la configuración de un contexto E3.0.

2.5.1 Evolución planteamientos oferta-demanda

Tradicionalmente, la forma que hemos tenido de estructurar la cobertura de la demanda de servicios energéticos ha estado enfocada exclusivamente del lado de la oferta, sin involucrar a la propia demanda en la organización de la cobertura de ese servicio. En efecto:

- El sistema eléctrico se regula exclusivamente desde el lado de la oferta (generación). Se deja que la demanda evolucione de forma totalmente ajena a las necesidades, y se procede a adaptar la capacidad de generación para acoplarse a la demanda, basándose en una previsión unilateral de cuál será el comportamiento futuro de la demanda.
- En el sector transporte se realizan aproximaciones discretas y de poca precisión a la estructura de la demanda, de acuerdo con la cual se establecen unas rutas y horarios fijos a los que la demanda debe someterse⁴¹ si quiere emplear estos medios de transporte.
- En el sector edificación se construyen edificios unilateralmente desde el lado de la oferta, lo que conduce a un parque de edificios muy superior al requerido, y con unos criterios de eficiencia en el uso prácticamente nulos⁴². Posteriormente estos edificios se dotan de unos sistemas de generación con una capacidad mucho más elevada de lo que requeriría un edificio eficiente, e incluso que la demanda media⁴³ del propio edificio.

Este enfoque, estructurado exclusivamente desde el lado de la oferta, es intrínsecamente muy ineficiente:

- La regulación desde el lado de la oferta del sistema eléctrico implica, en un contexto BAU, poner en juego centrales de bajo rendimiento energético⁴⁴ que operan durante muy pocas horas al año, así como disponer de una red de transporte y distribución tremendamente sobredimensionada en relación a la demanda media (dimensionada para picos), y centrales continuamente dispuestas para entrar en operación (potencia rodante) que prácticamente no aportan generación útil al sistema pero le hacen incurrir en unos consumos parásitos. Cuando las renovables empiezan a representar una contribución significativa, este enfoque basado en la oferta conduce⁴⁵ a la necesidad de disipar capacidad de generación eléctrica renovable, aspecto al que ya estamos asistiendo hoy en día en España con el grado de penetración eólica y solar, y que en el extremo puede conducir a la necesidad de disipar⁴⁶ prácticamente tanta capacidad de generación como la electricidad útil producida tal y como mostramos de forma cuantificada en (GP, 2007).
- En el sector transporte, la estructuración desde el lado de la oferta conduce a situaciones en las que el denominado “transporte público”, potencialmente de mayor eficiencia energética que el particular, alcanza bajas cotas de utilización por no tener capacidad de ajustarse a los requerimientos de la demanda, o que incluso se convierta en un modo de transporte altamente ineficiente⁴⁷. En general, este planteamiento desde el lado de la oferta conduce a unos recorridos de transporte fijos, transitados con vehículos adaptados a la

⁴¹ Resultado: abrumadora mayoría del transporte particular en la cobertura de la demanda de movilidad, con unas tasas de propiedad de vehículo particular increíblemente elevadas.

⁴² Pues el constructor / promotor no va a hacerse cargo de los costes económicos para operar el edificio.

⁴³ Pues se dimensionan para la demanda pico incrementada en los correspondientes “factores de seguridad”.

⁴⁴ Este bajo rendimiento energético está asociado a unos bajos costes de inversión, que convierten a estas centrales en las más apropiadas para situaciones en las que se va a operar pocas horas al año.

⁴⁵ En ausencia de una integración del sistema energético, que es lo que corresponde a un enfoque basado en la oferta. Una integración real del sistema energético requiere de una participación muy activa de la demanda.

⁴⁶ Este concepto de necesidad de disipación de capacidad de generación eléctrica renovable es lo que frecuentemente a lo largo de este informe referimos como “electricidad residual” en un contexto de gran penetración renovable.

⁴⁷ Como por ejemplo un autobús interurbano de 64 plazas transportando un único pasajero, y a lo largo de un trayecto que es el doble de largo de lo necesario.

demanda punta y por tanto con bajo factor de capacidad.

- En el sector edificación, la estructuración desde el lado de la oferta nos ha conducido, por un lado, a un parque de edificios altamente ineficientes, que demandan cantidades muy elevadas de energía y a menudo de la forma más inconveniente posible⁴⁸, lo que obliga a poner en marcha centrales de baja eficiencia y a sobredimensionar las redes de distribución y equipos de transformación asociados. Adicionalmente los edificios se dotan de sistemas energéticos muy sobredimensionados respecto a la demanda media, con la consiguiente ineficiencia económica o energética⁴⁹.

Las causas fundamentales de este planteamiento orientado desde la oferta probablemente podemos encontrarlas entre las siguientes:

- Mayor comodidad desde el lado del actor que oferta el servicio. Su único acercamiento a la demanda consiste en realizar un análisis prospectivo de por dónde andará el mercado que quiere abastecer⁵⁰, y valorar si dicho mercado le proporciona un margen de negocio aceptable. El evitar las interacciones, o limitarlas al máximo⁵¹, con ese ente difuso⁵² que es la demanda siempre ha sido una prioridad que simplificaba considerablemente la estructuración del modelo de negocio.
- Introducción de diferencias competitivas que permiten que solo unos pocos, aquellos que disponen del capital y los medios suficientes para plantearse la cobertura unilateral de la demanda desde el lado de la oferta, puedan optar a “explotar” esos nichos de mercado. Este concepto

se extiende incluso al tipo de tecnologías empleadas para cubrir la demanda de ese servicio: si esas tecnologías están tan solo al alcance de unos pocos⁵³, se verá reducida la competencia en la cobertura de esos nichos de mercado.

Pero es precisamente por este enfoque basado en la oferta, que nuestro sistema energético es, en la actualidad, tan abrumadoramente dependiente de fuentes energéticas concentradas y poco democráticas⁵⁴. Sin embargo, esta situación ha llegado a sus límites al acercarnos al agotamiento de esos recursos y al reclamar el conjunto de la población mundial acceso a unos servicios energéticos que esos recursos no pueden proporcionarles. Esto, junto a la manifiesta superación de las condiciones de contorno que nos imponía el sistema climático, ha desencadenado la urgencia de la transición hacia un contexto E3.0.

Cuando se ponen en juego herramientas, como la inteligencia de los sistemas en los que estructuramos nuestra sociedad, que permiten articular la participación activa y directa de la demanda en la cobertura de los servicios, se libera un tremendo potencial de eficiencia y de articular cambios en escalón. El contexto E3.0 está por tanto basado en una participación activa de la demanda.

Probablemente uno de los principales elementos que caracterizan los enfoques basados en la oferta es su rigidez, aspecto que además de llevar asociadas una serie de ineficiencias energéticas y económicas, les hace inviables para adaptarse a una situación de cambio como en la que nos encontramos, desembocando en diversos episodios de crisis. El contexto E3.0 aporta como principal elemento distintivo, una elasticidad intrínseca.

⁴⁸ Por ejemplo los picos de refrigeración simultáneos en verano.

⁴⁹ En el pasado, los equipos de generación de calor y frío de los edificios presentaban un rendimiento a carga parcial considerablemente peor que el del plena carga, por lo que el sobredimensionado ha conducido a un innecesario despilfarro energético. Esta situación está cambiando actualmente con las nuevas generaciones de equipos de generación de frío y calor más eficientes, basados fundamentalmente en la operación a caudales y velocidades variables. Con estos nuevos equipos, las prestaciones a carga parcial mejoran respecto a las de diseño hasta llegar a estados de carga muy bajos. Sin embargo, la gran mayoría de instalaciones de generación en el sector edificación siguen sin incorporar estas tecnologías más eficientes, y en cualquier caso, el sobredimensionado sigue representando una ineficiencia económica.

⁵⁰ Esta aproximación tan limitada en el alcance, que no mira la globalidad sino tan solo su nicho de mercado, ha sido capaz de proporcionar los beneficios necesarios mientras la acumulación de estos nichos no se ha acercado a las restricciones de las condiciones de contorno del sistema en el que se desarrollan.

⁵¹ Buena muestra de ello son los servicios de “atención” al cliente que se han desarrollado.

⁵² Es precisamente la inteligencia lo que permite evitar estos aspectos “negativos” de la interacción con la demanda y destapar todo su potencial de mejora de eficiencia.

⁵³ Esta probablemente sea una de las causas de más peso que han generado la gran resistencia que hemos vivido en las últimas décadas a la entrada de las tecnologías renovables de forma significativa en los mix de generación.

⁵⁴ Al alcance tan solo de unos pocos.

2.5.2 Sistemas técnicos inteligentes

La inteligencia de los sistemas técnicos es uno de los elementos relevantes⁵⁵ que actúan como facilitadores de la participación activa de la demanda en la operación de dichos sistemas.

En todos los sectores del sistema energético estamos asistiendo en la actualidad a un despliegue del potencial de actuación inteligente:

- Redes eléctricas inteligentes, con capacidad de transportar y procesar información, así como de actuar para modificar dinámicamente las condiciones, y permitiendo una respuesta inteligente de la demanda ante las capacidades, necesidades y posibilidades de generación del sistema.
- Sistemas de transporte inteligentes, que responden directamente a las necesidades de la demanda de la forma más eficiente, proporcionando los mecanismos para que la propia demanda se adapte a las posibilidades del sistema de transporte poniendo en una balanza los requerimientos de urgencia, eficacia y coste. Estos sistemas se encuentran integrados dentro del sistema energético y participan de forma activa en su operación y regulación, respondiendo a las posibilidades y necesidades de dicho sistema, y transmitiendo las señales apropiadas al demandante final de servicios, para hacerle copartípe y corresponsable de la operación del sistema energético integrado.
- Edificios inteligentes, con capacidad de cubrir la demanda de servicios finales con el mínimo consumo de energía, y de establecer vínculos de comunicación bidireccional entre el sistema energético y los demandantes de servicios finales en el sector

edificación, contribuyendo, por tanto, a la integración de dicho sistema energético y a la articulación de la gestión de la demanda.

- Sistemas industriales inteligentes, que además de cubrir las necesidades con elevada eficiencia, contribuyen a la integración del sector industrial dentro del sistema energético, lo que le convierte en copartípe del mismo.

Estos elementos de inteligencia en los sistemas técnicos ya están emergiendo entre nosotros: están disponibles. La labor adicional consiste tan solo en integrarlos correctamente dentro del contexto general, haciendo que los otros sistemas (económico, político) les acompañen proporcionando el contexto para permitir el despliegue de todo el potencial de estas tecnologías en la articulación del proceso de cambio. Pero así como este hecho constituye un mensaje de esperanza, también debe hacernos tomar una clara conciencia del imperioso requerimiento de activación de la inteligencia en los sistemas no técnicos, evitando pensar que los sistemas técnicos por sí solos nos resolverán la problemática actual, pues al deshacerse el espejismo nos encontraríamos en una situación peor que la actual debido al tiempo perdido.

2.5.3 Sistemas socioeconómicos inteligentes

Actualmente, prácticamente cualquier actuación que planteamos para encaminarnos hacia la sostenibilidad choca frontalmente con la estructura de nuestro sistema económico, y dada la fuerza predominante de éste, como motor de nuestra sociedad, las actuaciones en sostenibilidad quedan totalmente relegadas a un segundo plano, a una decoración sin capacidad alguna de cambio,

⁵⁵ Pero no el único, pues sin el necesario despliegue de inteligencia por los otros sistemas, la inteligencia de los sistemas técnicos puede quedar relegada a un aspecto anecdótico sin impacto real en la transición hacia el contexto E3.0.

sobre impuesta a la corriente principal que desbocada nos sigue llevando en dirección contraria a la sostenibilidad.

La única opción que parece quedarnos disponible para operar el cambio en los cortos plazos de tiempo disponibles es alinear la fuerza principal que mueve nuestra sociedad con los requerimientos de sostenibilidad, en lo que se ha dado en conocer como una economía energética basada en prestaciones. En el momento en que consigamos que el origen del beneficio económico esté íntimamente ligado a la eficiencia y ahorro energético en lugar de al despilfarro, habremos alineado la principal fuerza motora de nuestro sistema con nuestros intereses globales, y habremos liberado el principal mecanismo de introducción de cambios en escalón.

Sin la extensión de la inteligencia más allá de los sistemas técnicos, el amanecer de la inteligencia de los sistemas técnicos que actualmente estamos viviendo nos conducirá a un gran fiasco dadas las expectativas que estamos poniendo en ello para arreglar “todos” nuestros problemas.

En efecto, la inteligencia de los sistemas técnicos es una herramienta fundamental para afrontar los problemas a los que nos enfrentamos, pero en términos matemáticos podríamos decir que es un elemento necesario pero no suficiente para resolver las problemáticas.

De bien poco nos sirve tener una red inteligente, con capacidad de transmitir información en tiempo real y con capacidad de actuación distribuida, si la comunicación que se establece entre generadores, demanda y operador del sistema es nula, y si además seguimos con una estructura energética que por un lado nos hace depender de recursos no renovables, y por otro lado implementa

equipamientos no eficientes. De bien poco nos sirve desarrollar un sistema de transporte inteligente, si no se consigue articular un diálogo y participación directa de la demanda, pues los vehículos “inteligentes” se moverán por las infraestructuras “inteligentes” con factores de capacidad muy bajos y un gran despilfarro energético. Es decir: la inteligencia de los sistemas técnicos simplemente posibilita que se establezca el diálogo entre oferta y demanda para optimizar el sistema, pero en ningún modo garantiza que dicho diálogo se acabe materializando.

Un elemento fundamental para articular y hacer realidad esta comunicación bidireccional entre demanda y oferta, que posibilita el despliegue de inteligencia técnica, es que uno de los motores principales que mueve nuestra sociedad, el sistema económico, también evolucione hacia la inteligencia global.

Hasta la fecha, los mecanismos en los que hemos estructurado el sistema económico, al estar basados principalmente en la venta de cantidad de productos en lugar de en la cobertura de servicios con los mínimos recursos, son intrínsecamente muy ineficientes. Veamos un par de ejemplos sectoriales:

- En el sector edificación, el modelo de negocio establecido vende unidades de edificios sin ninguna corresponsabilidad sobre los requerimientos futuros de operación de dichos edificios. Por tanto, un promotor de un edificio no tiene aliciente económico directo⁵⁶ alguno en implementar medidas de eficiencia porque sus beneficios no están relacionados con el nivel de ahorro alcanzado, sino más bien todo lo contrario: el objetivo es cómo gastar el mínimo dinero en la inversión inicial sin comprometer el precio de venta objetivo que se ha fijado en ese piso.

⁵⁶ Los alicientes que se están introduciendo en esta dirección son indirectos en el sentido de que están basados en mecanismos de respuesta lenta. Un ejemplo de ello podrían ser los procedimientos de certificación energética y ambiental de los edificios.

- En el sector transporte, los fabricantes de vehículos basan su modelo de negocio en el número de unidades vendidas, independientemente⁵⁷ de la eficiencia con la que dichas unidades cubran la demanda de movilidad en el futuro, pues los fabricantes de los vehículos no sacan ninguna ventaja adicional de una mayor eficiencia energética. De hecho, en el contexto actual es precisamente todo lo contrario: un uso más eficiente de los vehículos al emplearlos con mayor factor de capacidad, directamente reducen sus ventas y margen de beneficio.
- Por más inteligente que sea la red eléctrica, mientras el modelo de negocio de los generadores se base directamente en la cantidad de energía vendida, y no se retribuya a los consumidores su participación activa en la operación del sistema, apartando las barreras que impedirían a la inteligencia de la red actuar sobre dominio privado de los consumidores, la operación y regulación del sistema seguirá basada mayoritariamente en la oferta con todas sus ineficiencias asociadas.

El gran potencial de la introducción de inteligencia en el sistema económico es que permite catalizar cambios en escalón con tiempos de respuesta muy cortos, modificando radicalmente la inercia y tendencia evolutiva del sistema productivo⁵⁸.

Así, en el marco de un sistema económico basado en prestaciones energéticas⁵⁹ pueden establecerse los siguientes modelos de negocio e introducir fuerzas determinantes en la senda que adopte nuestra sociedad:

- Edificación eficiente. El promotor se responsabiliza de los costes de operación del edificio, vendiendo dichos servicios más allá que el propio edificio. La generación de beneficios en su modelo de negocio pasa a

estar basada en proporcionar los servicios comprometidos con la máxima eficiencia (mínimo coste en ciclo de vida), por lo que lejos de que el sistema económico le impulse a la necesidad, o deseo, de construir el máximo número de edificios, su objetivo será construir el mínimo posible para cubrir la demanda de servicios en el mercado.

- Sistema de transporte eficiente. Basado en la venta de servicios de movilidad, tanto las compañías de servicios de movilidad, como los fabricantes de automóviles con los que las primeras pueden suscribir acuerdos estratégicos, desacoplan sus ingresos del kilometraje y del número de unidades de vehículos vendidos. Por el contrario, su incentivo está directamente vinculado a la cobertura de la demanda de movilidad con el mínimo uso de recursos, lo que potencia la producción de vehículos eficientes en el mínimo número posible, puesto que dada una demanda de servicio de movilidad sus ingresos serán los mismos independientemente del número de vehículos vendidos, minimizándose los gastos al reducir el número de vehículos producidos y al minimizar los consumos energéticos asociados a cubrir esa demanda de movilidad.
- Sistema eléctrico integrado y eficiente. Con los adecuados mecanismos de mercado que retribuyan al consumidor final los servicios complementarios que puede aportar al sistema eléctrico para su operación y regulación, se consigue destapar todo el potencial de la gestión y respuesta de la demanda, de tal forma que el despliegue de inteligencia (técnica y económica) alcanza su máximo beneficio potencial, liberando una ingente cantidad de recursos para operar el sistema eléctrico y valorizar la electricidad residual, lo que invierte totalmente la situación actual al desplazar el

⁵⁷ Siempre y cuando dicha ineficiencia no sea tan diferencial frente a otros fabricantes que les desplace del mercado. Aparte de esto, solo quedan las imposiciones de la regulación, muchas de las cuales son actualmente de carácter voluntario, por lo que todavía quedan más diluidas.

⁵⁸ Un primer ejemplo del potencial de cambio de los mecanismos introducidos en el sistema económico lo hemos vivido con las FIT (Feed In Tariff), o tarifas de introducción de las energías renovables dentro del régimen especial. El dotar al sistema de una tarifa o prima asociada a la generación renovable, conduce, por un lado, a vincular el gasto asociado a la introducción de esas tecnologías directamente con su generación, lo que proporciona una garantía de resultados muy superior a lo que permite un mecanismo de apoyo basándose en subvenciones. Por otro lado, hemos asistido al hecho de que la presencia de este mecanismo de mercado ha conseguido acelerar la introducción de las tecnologías mucho más allá de lo que la mayoría pensaba, sobrepasando las expectativas de lo que se creía que podría ser viable desde el punto de vista de los ritmos de implementación comercial, hasta invertir en pocos años la situación bajo la que el resto del sector energético consideraba a las energías renovables: pasar de considerarlas una "decoración" del sistema energético sin capacidad de dar las respuestas que daban los combustibles fósiles, a entrar en pánico por ver que ya les han comido un trozo significativo de su nicho de mercado y que en poco tiempo podrían desplazarlos por completo, y pasar a desplegar una ofensiva articulada por el Ministerio de Industria encaminada a sabotear de mala manera el avance de estas tecnologías. En efecto, esto puede considerarse un cambio en escalón sobre la evolución tendencial. De hecho, el mecanismo de las FIT podría fácilmente extenderse a los negativos (medidas eficiencia), como mecanismo de mercado eficaz con capacidad de vincular retribución a garantías de resultados.

⁵⁹ Conocido en siglas anglosajonas como PBE (Performance Based Energy Economy).

protagonismo desde el lado de la generación al de la demanda.

En (García Casals X., 2009) se desarrollan con más detalle líneas de negocio con algunas de las ideas arriba comentadas para concretar y cuantificar cómo se podría articular esta transición hacia el despliegue de inteligencia en el sistema económico.

Todos estos cambios potenciales en el sistema económico deben interpretarse en clave positiva, pues tenemos capacidad de implementarlos, y no solo contribuyen de forma muy significativa a articular los mecanismos que nos permitan resolver la problemática ambiental y de recursos con la que actualmente nos enfrentamos, sino que además abren vía libre para un desarrollo económico sostenible que nos aparte de las depresiones profundas a las que conduce la crisis patente del modelo actual.

Por otro lado, aunque en este informe no entraremos en este aspecto, el despliegue de inteligencia también debe abarcar al sistema social para conseguir realizar todo su potencial. Dada la estructura actual de nuestros sistemas económico y político, el gran motor de cambio que puede actuar como facilitador del despliegue de inteligencia por los sistemas político y económico es precisamente la maduración y participación activa del sistema social. Y esto también es algo perfectamente a nuestro alcance, requiriendo tan solo de que tomemos conciencia de nuestro papel fundamental como individuos en la definición y operación de los sistemas en los que nos organizamos⁶⁰, así como de las repercusiones de nuestras actuaciones tanto a nivel local como a nivel global. En este sentido, el proceso de globalización en la que vivimos también nos tiende una serie de trampas de las que debemos tomar conciencia para no caer en ellas.

Un claro ejemplo es la tendencia actual a “limpiar culpas” alistándonos a una causa global (y en muchos sentidos lejana), desatendiendo por completo las implicaciones de nuestras actuaciones a nivel local⁶¹ por más que estas vayan en dirección contraria a nuestras propias pretensiones globales.

En este sentido, probablemente el principal “eslabón perdido” para articular el proceso de cambio hacia la sostenibilidad global esté en los individuos y la sociedad pasando a ser actores dominantes en la configuración y operación de los sistemas en los que estamos organizados, en lugar de dejarse arrastrar por su corriente.

2.5.4 Sistemas políticos inteligentes

La incorporación de inteligencia en los sistemas políticos para regular y activar los mecanismos que permitan que se extienda la inteligencia por los sistemas técnico y económico, así como para controlar el sistema administrativo de forma que actúe de forma coherente con las políticas que se pretenden impulsar, constituye una pieza fundamental en este proceso de despertar de la inteligencia global.

Evidentemente, a juzgar por la situación actual tanto a nivel local, autonómico, nacional e internacional, y el lento avance de las negociaciones bajo el Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, nos encontramos abismalmente lejos de esta situación. Pero como ya se ha señalado en diversas ocasiones, los políticos son completamente “renovables”, por lo que las opciones de un cambio radical en este sistema siempre están abiertas. La responsabilidad de quienes ocupan estos cargos para su servicio por y para la sociedad, así como la decidida actuación de la sociedad para exigir estas

⁶⁰ Primero vino el individuo, y después los sistemas en los que se organizó que fueron creados por los individuos, por mucho que la pereza y tendencia a escurrir el bulto a menudo nos haga creer que el orden es el contrario.

⁶¹ La situación de enajenamiento de la población respecto a las actividades de la administración local constituye un claro ejemplo, lo que conduce a situaciones de impunidad absoluta en la que se hace un uso del sistema administrativo para beneficio particular de unos pocos, aspecto que, de hecho, se encuentra en la raíz del origen de la mayoría de problemáticas globales a las que nos alistamos. En el mundo rural es más fácil poder identificar claramente esta situación, aunque el grueso de la población a menudo opte por mirar en otra dirección, pero también está presente en el mundo urbano, donde el gran efecto de dilución y alejamiento del sistema administrativo facilita mucho más este enajenamiento de la población.

responsabilidades son las llaves que permitirían habilitar la entrada de inteligencia global en este sistema. Por tanto la capacidad de desarrollar un cambio en escalón en este sistema es muy elevada, pues tan solo requiere un cambio de actitud a nivel de individuo, y este puede tener lugar tan rápido como queramos una vez adquirida la conciencia de nuestra responsabilidad.

2.6 Electrificación del sistema energético y sus repercusiones

La integración del sistema energético es un elemento imprescindible para alcanzar los niveles de eficiencia que exigen los requerimientos de sostenibilidad. En (GP, 2007) ya analizamos este aspecto desde la perspectiva del uso eficiente de las energías renovables en el sistema eléctrico⁶², y en este informe profundizaremos sobre estos aspectos.

Al plantearse la integración del sistema energético, el vector electricidad aparece a su vez como un elemento fundamental para facilitar esta integración y para permitir que el conjunto de los recursos renovables queden accesibles a las distintas aplicaciones de todos los sectores energéticos.

Por tanto, a lo largo de este informe iremos viendo cómo la electrificación⁶³ se va imponiendo en todos los sectores energéticos como elemento de eficiencia, integración y sostenibilidad. Sin embargo, este concepto, con gran peso de fondo, no debe hacer perder de vista el hecho de que la electricidad como tal no es más que un vector energético intermedio, y por tanto no constituye per se garantía alguna de sostenibilidad. Dicho de otra forma: la electrificación de los distintos sectores energéticos aparece como una condición necesaria pero no suficiente para la

sostenibilidad, y no debe de perder en ningún momento de vista el cómo se genera esa electricidad ni la cantidad de electricidad que se requiere generar.

2.6.1 La descarbonización del sistema eléctrico

La progresiva descarbonización del sistema eléctrico es un hecho contrastado que, a medida que se va desplegando, modifica la jerarquía de las tecnologías más apropiadas para cubrir distintos servicios energéticos. De hecho, la madurez y capacidad de cambio del sistema eléctrico es considerablemente superior a la de otros sistemas energéticos, por lo que es en este sistema donde vamos a asistir a una mayor velocidad de descarbonización, lo cual constituye un motivo adicional⁶⁴ para impulsar la electrificación de los otros sectores energéticos⁶⁵.

En efecto, el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico Español en 2008 fue de 390 g CO₂/kWh_e (CNE, 2009), inferior para el sistema eléctrico peninsular (en torno a 325 g CO₂/kWh_e)⁶⁶. En el año 2009 el coeficiente de emisiones para el sistema eléctrico Español ya había descendido a 270 g CO₂/kWh_e (CNE, 2010). La tendencia para los próximos años es a la progresiva descarbonización mediante la creciente integración de energías renovables, por lo que cabe esperar que en los próximos años asistamos a una rápida reducción del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico.

A modo de ejemplo de las implicaciones de distintos escenarios actuales sobre la evolución prevista del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, en la figura 22 presentamos la evolución de dicho coeficiente de emisiones asociado al escenario de sustitución de

⁶² En el sentido de aprovechar la electricidad "residual" debida al requerimiento de regulación del sistema eléctrico basado en renovables con una demanda que no participa en la operación del sistema (ciega).

⁶³ Esta electrificación incluye el potencial uso del hidrógeno producido vía electricidad de fuentes renovables como vector energético, en aquellas aplicaciones donde el valor añadido que proporcione, merced a su capacidad de acumulación, compense las penalizaciones energéticas asociadas a las pérdidas en el proceso de generación, transporte y distribución del hidrógeno.

⁶⁴ Motivo adicional que encaja muy bien con el requerimiento de elevado ritmo de evolución requerido en el sistema energético, pero el principal motivo para la electrificación de otros sectores energéticos es, como apuntábamos antes, la necesidad de integración y eficiencia del sistema energético.

⁶⁵ Siempre y cuando esta descarbonización pase por la incorporación de energías renovables en el sistema de generación, y no por la sustitución de los GEI por otros residuos, servidumbres y limitaciones como es el caso de la energía nuclear.

⁶⁶ Resulta interesante observar que el coeficiente de emisiones de la electricidad peninsular implementado en las herramientas de certificación energética oficiales en España es de 649 g CO₂/kWh_e (ref IDAE, 2009), totalmente alejado de los valores actuales, pudiendo contribuir a desfigurar la calificación energética de edificios, y a desplazar las soluciones adoptadas hacia mayores emisiones.

los parques de generación nuclear y fósil del sistema eléctrico peninsular publicado en (García-Casals X., 2009), que como podemos observar (figura 23) no difiere demasiado de los escenarios oficiales que están manejando en países como el Reino Unido con una carbonización actual del sistema eléctrico considerablemente superior a la nuestra (CCC, 2009). En el contexto de estos escenarios, en un plazo de tiempo muy breve podríamos tener sistemas eléctricos con coeficientes de emisiones de GEI muy bajos, por lo que siempre y cuando la generación de esa electricidad se produzca mediante fuentes de energía renovable, la electrificación de los distintos sectores energéticos (edificación, transporte e industria) puede constituir la vía más rápida y eficiente para orientarlos hacia la sostenibilidad. A su vez, esta integración de los distintos sectores energéticos a través del vector electricidad es altamente sinérgica, en el sentido de que los diversos sectores energéticos, mediante su electrificación, pueden adquirir un importante papel activo en la regulación efectiva de la operación de un sistema ba-

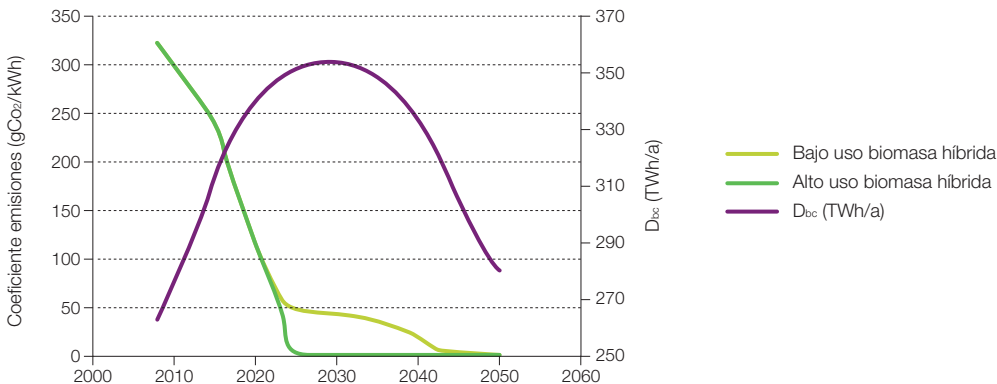
sado en energías renovables, al desplegar el potencial de la gestión de la demanda mediante una red inteligente.

2.6.2 Electricidad residual

A lo largo de este informe usamos frecuentemente el término “electricidad residual” que introducimos en el informe (GP, 2007). Con esta nomenclatura queremos poner de manifiesto una ineficiencia energética del enfoque BAU basado en la oferta y sin integración del sistema energético. El contexto E3.0 conduce precisamente a la valorización de esta electricidad residual, por lo que deja de ser un “residuo” para convertirse en un elemento importante para impulsar la eficiencia del sistema integrado.

Puesto que este concepto surge con frecuencia en los planteamientos realizados en este informe, y tiene un impacto relevante sobre diversos enfoques dentro del contexto E3.0, que rompen con algunas ideas preconcebidas

Figura 22. Escenario de evolución del coeficiente de emisiones de CO₂ del sistema eléctrico peninsular asociado a los escenarios de (García-Casals, X, 2009).
D_{bc} = demanda en bornas de central.



sobre la eficiencia energética, nos ha parecido adecuado recoger en este punto algunas consideraciones sobre el término “electricidad residual”.

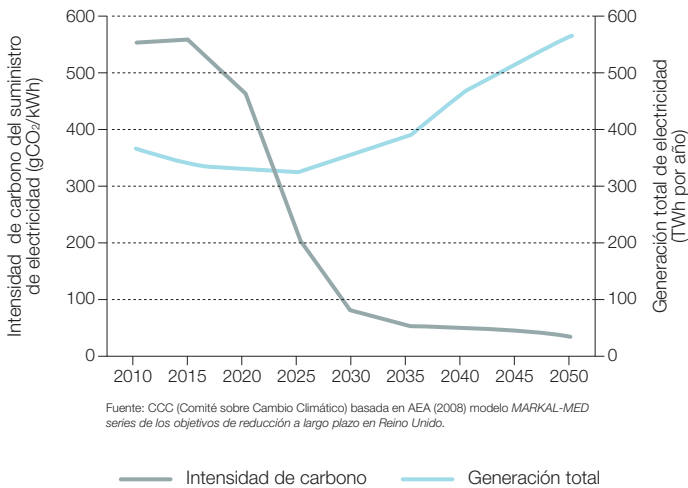
Entendemos por “electricidad residual” aquella electricidad producible con fuentes renovables no acumulables, que por motivos de regulación del sistema eléctrico no llega a producirse para adaptar la oferta a la demanda. Esta es la situación a la que con cada vez más frecuencia se enfrentan los parques eólicos en España durante las horas valles de la demanda eléctrica: el diferencial entre el nivel de demanda y la generación de las centrales rígidas del sistema, se acerca a cero, con lo que desde el operador del sistema (REE) se mandan ordenes de desconexión de los parques eólicos.

Actualmente, esta situación representa un agravio económico para los operadores de dichos parques eólicos, pues dejan de cobrar

el precio y prima del Régimen Especial asociada a esa electricidad que dejaron de producir sin tener por ello ningún ahorro o ingreso adicional⁶⁷, y comprometiendo⁶⁸, por tanto, la rentabilidad de la inversión que realizaron al desarrollar esta central. En un futuro como el descrito en el informe (GP, 2007), en el que la demanda se cubre totalmente con fuentes de energía renovable desde el lado de la oferta, esta “electricidad residual” constituye una ineficiencia del sistema energético total, y por ello trae la consecuencia de un mayor coste y explotación de recursos de lo que sería necesario, para cubrir la demanda en un contexto E3.0.

En un sistema eléctrico basado en las fuentes de energía renovable, la valorización de esa gran cantidad de “electricidad residual” vía la integración del sistema energético apoyándose en la inteligencia conduce a importantes cambios de paradigma en relación a cómo articular los distintos subsistemas energéticos

Figura 23. Escenario de evolución del coeficiente de emisiones de CO₂ del sistema eléctrico del Reino Unido (CCC, 2009).



⁶⁷ En efecto, en aquellas fuentes renovables distintas a la biomasa en la que el recurso de energía primaria no es acumulable o el sistema de acumulación se encuentra en su capacidad máxima (como la termosolar), el dejar de producir esa electricidad no produce ahorro alguno (no hay consumo de combustible), sino más bien lo contrario al introducir requerimientos adicionales sobre el procedimiento de operación. Si además este servicio complementario de regulación no se retribuye, la pérdida para el operador de la central es neta.

⁶⁸ El sistema de primas a la generación del Régimen Especial está, en principio, pensado para poder proporcionar la rentabilidad suficiente al inversor como para que se desarrollen esas centrales.

para alcanzar la mayor eficiencia. En general, la tendencia principal para alcanzar la eficiencia en este contexto pasa por la electrificación a gran escala de todos los sectores energéticos (edificación, transporte e industria), modificando los planteamientos que en un contexto BAU podíamos tener sobre la eficiencia⁶⁹. A lo largo de este informe desarrollamos estos cambios de paradigma en los que se apoya gran parte del contexto E3.0, y en los puntos siguientes procedemos a profundizar sobre algunos de estos aspectos desde un punto de vista conceptual.

2.6.3 Implicaciones para las buenas prácticas del pasado

Como apuntábamos anteriormente, la disponibilidad de un sector eléctrico abastecido fundamentalmente con energías renovables, y la posibilidad de electrificar de forma eficiente los distintos sectores energéticos, trae consigo la necesidad de replantearse lo que en el pasado se consideraban las mejores prácticas sectoriales desde el punto de vista de la eficiencia. A continuación comentamos brevemente algunos de estos puntos para mostrar la importancia que tiene el replantearse la forma de proceder del pasado a la luz del nuevo contexto.

2.6.3.1 Cobertura de la demanda térmica en el sector edificación

Tradicionalmente hemos manejado la idea de que resultaba más eficiente, energéticamente hablando, el cubrir la demanda de energía térmica de los edificios mediante energía térmica⁷⁰ que mediante energía eléctrica. El concepto subyacente en esta idea es el bajo rendimiento con el que tradicionalmente convertíamos la energía de los combustibles

fósiles en electricidad en las centrales térmicas (30%-40%). Este concepto también es el que subyace en el planteamiento tradicional de la mayor eficiencia de la cogeneración, pues el aprovechamiento del calor residual producido en la generación de electricidad mediante combustibles fósiles (o cualquier otro combustible químico o nuclear) conduce a un ahorro de energía primaria⁷¹ (y por tanto de emisiones) respecto a la opción de generar independientemente electricidad y energía térmica a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, debemos estar dispuestos a revisar estos conceptos a la luz de la evolución de nuestro sistema energético, pues las soluciones más apropiadas para el pasado no tienen por qué ser las más adecuadas en el futuro cercano.

La elevada descarbonización que cabe esperar experimente nuestro sistema de generación eléctrica⁷², representa un cambio radical que nos fuerza a reconsiderar el concepto tradicional de que la generación térmica con calderas, o incluso la cogeneración, representan las soluciones más eficientes.

En efecto, el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico Español en 2008 fue de 390 g CO₂/kWh_e (ref CNE, 2009), inferior para el sistema eléctrico peninsular (en torno a 325 g CO₂/kWh_e). Ya incluso en estas condiciones, si tenemos en cuenta que una caldera de gas natural⁷³ de elevado rendimiento promedio (95%) produce unas emisiones de 215 g CO₂/kWh_t⁷⁴, la electrificación de la demanda térmica del edificio mediante bombas de calor con unas prestaciones disponibles en el mercado Español (COP = 3,5)⁷⁵ nos conduciría a unas emisiones de 93 g CO₂/kWh_t en el sistema eléctrico peninsular, que teniendo en cuenta el estándar Japonés para las bombas de calor domésticas en 2010 (COP ≈ 6,5) se podría reducir a 50 g CO₂/kWh_t. Y la situación

⁶⁹ Este cambio de paradigma es especialmente cierto para el caso de la demanda de energía térmica.

⁷⁰ Calderas de combustible.

⁷¹ Cuando este ahorro de energía primaria es superior a un 10% calificamos la cogeneración como de alta eficiencia según la Directiva 2004/8/EC.

⁷² De acuerdo con la creciente penetración de energías renovables que tendremos que impulsar en los próximos años si queremos tener opciones de estabilizar el sistema climático de nuestro planeta.

⁷³ Con cualquier otro combustible fósil las emisiones serían superiores.

⁷⁴ Notar la distinción entre los kWh según el tipo de forma final de energía a que se refieren. Añadimos un subíndice "e" para referir los kWh en forma de electricidad (kWh_e), mientras que en las aplicaciones térmicas añadimos un subíndice "t" para indicar que se trata de energía térmica útil para cubrir la demanda correspondiente (kWh_t).

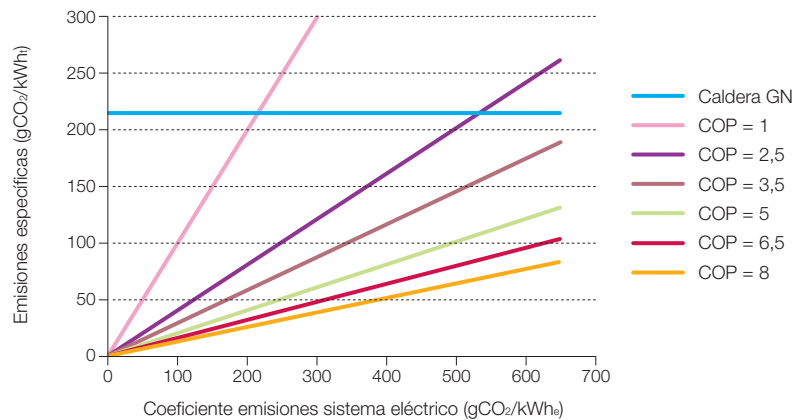
⁷⁵ COP: Coefficient Of Performance. Expresa la eficacia de una bomba de calor como cociente entre la energía térmica útil que proporciona y la electricidad que consume. El COP depende mucho de las temperaturas a las que opere la bomba de calor, y por tanto depende de la evolución de la temperatura del foco frío (ambiente exterior o terreno) que se modifica a lo largo de la estación de calefacción, y de la temperatura a la que queramos disponer de la energía térmica útil (los sistemas de distribución radiante como el suelo radiante o los muros radiantes permiten alcanzar COP mucho más elevados al distribuir la energía térmica a una temperatura del orden de la mitad de un sistema de calefacción por radiadores convencionales). En estas comparativas debe entenderse el COP indicado como el valor medio estacional.

va mejorando a medida que pasa el tiempo: En el año 2009 el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico Español ya era de 270 g CO₂/kWh_e, por lo que las emisiones asociadas a la producción de un kWh térmico se reducen a 77 g CO₂/kWh_t para COP = 3.5 y a 42 g CO₂/kWh_t para COP = 6.5, es decir, menos de una quinta parte de las asociadas a emplear una caldera del alta eficiencia.

Esta situación cabe esperar que se acentúe todavía mucho más en los próximos años, en los que asistiremos a una rápida descarbonización del sistema de generación eléctrica mediante energías renovables. En la figura 24 presentamos la evolución de las emisiones específicas por unidad de energía térmica útil generada en función de la evolución de coeficiente de emisiones del sistema eléctrico. El límite superior de la escala son los 649 g CO₂/kWh_e que impone la certificación energética de edificios en España (CALENER) para los equipamientos que usen electricidad⁷⁶. La situación actual del sistema eléctrico español

serían los 270 g CO₂/kWh_e anteriormente comentados. Entre las bombas de calor, incluimos lo que sería un sistema de calefacción eléctrica por efecto resistivo⁷⁷ puro representado por el COP = 1. El resto de valores de bombas de calor representarían el rango de opciones de mercado en España para las bombas de calor aerotérmicas (COP = 2.5-3.5), una bomba de calor del orden de lo que nos podría aportar una buena bomba de calor geotérmica (COP = 5), el estándar actual para bombas de calor aerotérmicas en Japón (COP = 6.5), y lo que podríamos considerar una prospectiva tecnológica de lo que nos pueden aportar las bombas de calor (COP = 8). Como podemos observar, incluso para un sistema eléctrico muy carbonizado (650 g CO₂/kWh_e) las bombas de calor pueden suponer una mejora respecto a la caldera de GN siempre que empleemos equipos con COP ≥ 3. Pero en las condiciones actuales de nuestro sistema eléctrico (270 g CO₂/kWh_e) las prestaciones de todas las bombas de calor indicadas resultan tremendamente ventajosas respecto a las de

Figura 24. Comparativa de las emisiones específicas asociadas a la generación de energía térmica útil, entre una caldera de gas natural eficiente (95% rendimiento estacional) y bombas de calor con distinto COP.



⁷⁶ Este valor tan alejado de la realidad decanta los diseños por elegir tecnologías menos eficientes desde el punto de vista de las emisiones, al otorgarles una mejor calificación energética: Éste es uno de los diversos ejemplos que ilustran cómo un procedimiento de certificación incorrectamente implementado actúa empujando al mercado en la dirección contraria a la requerida, por lo que más allá de constituir un mecanismo de respuesta lenta, puede degenerar en un mecanismo indeseado.

⁷⁷ Efecto Joule.

una caldera de gas. Es más, a partir del momento en el que el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico alcance los 215 g CO₂/kWh_e, incluso las calefacciones eléctricas por efecto resistivo puro pasarán a ser mejores desde el punto de vista de emisiones que la caldera de gas. Y en un contexto con elevada penetración renovable (coeficiente de emisiones del sistema eléctrico tendiendo a cero) todas las opciones eléctricas (incluyendo la resistiva pura) tienden a unas emisiones específicas nulas para producir la energía térmica requerida.

De hecho, las bombas de calor hay que entenderlas como tecnologías que aprovechan energía térmica de origen renovable⁷⁸ (solar para ser más precisos) almacenada en el aire (bombas aerotérmicas), o en la tierra (bombas de calor geotérmicas). En efecto, en una bomba de calor con COP = 4, que trabaja en modo calor, ¾ partes de la energía térmica aportada provienen de energía renovable (solar), y el ¼ restante proviene de la electricidad consumida por la bomba de calor, que a su vez tiene una contribución renovable que irá creciendo rápidamente a lo largo de los próximos años. Al ir aumentando el COP de las bombas de calor, crece la aportación renovable local, y al ir reduciéndose el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, desarrolla la aportación renovable “centralizada”⁷⁹. Eventualmente, al alcanzar un sistema de generación eléctrica 100% renovable, el aporte de energía térmica a los edificios equipados con bombas de calor (para calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS)) será 100% renovable.

Por tanto, vemos cómo al sector de la edificación se le abre no solo una, sino todo un abanico de opciones de alcanzar en los próximos años una integración del 100% de renovables para cubrir su demanda energética.

La primera batería de herramientas a implementar son sin duda las de eficiencia energética y bioclimatismo, es decir, medidas encaminadas a reducir la demanda de energía final del edificio. Y para el remanente de la demanda energética del edificio, aquella que haya que aportar de forma activa, se abren dos⁸⁰ vías de satisfacer esta demanda energética: sistemas descentralizados de energías renovables de origen térmico, y electrificación con bombas de calor que se apoyen en un sistema eléctrico centralizado cuya generación esté basada en energías renovables.

Cuál de estas dos vías se imponga depende de varios factores, entre los cuales, en primera instancia, podríamos citar los dos siguientes:

- Sinergias entre los distintos servicios energéticos a cubrir. En este sentido hay que tener en cuenta que a medio plazo, una vez aplicadas las medidas de eficiencia energética, los servicios energéticos de climatización del edificio (calefacción y refrigeración) van a ceder su actual protagonismo sobre la demanda energética total del edificio a otros servicios que forzosamente tienen que satisfacerse vía eléctrica (iluminación, equipamiento, bombas, ventiladores, etc.). En estas condiciones, el emplear el mismo vector energético (la electricidad) para cubrir las demandas energéticas de climatización, ofrece ventajas logísticas respecto a la opción de introducir nuevos vectores energéticos.
- Costes económicos de las distintas opciones. En el marco de mercado libre, las opciones de menor coste se imponen a las de costes superiores. En este aspecto, la opción eléctrica basada en bombas de calor eficientes y un sistema eléctrico centralizado abastecido por energías renovables tiene todos los puntos para resultar económicamente más favorable⁸¹ que los sistemas

⁷⁸ Y así lo refleja la Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Esta directiva contabiliza como aporte renovable de una bomba de calor la cantidad de calor ambiente movilizada por la misma, e introduce un requisito adicional de eficacia estacional mínima de la bomba de calor para que pueda contabilizarse su aporte renovable (el COP estacional debe ser superior a 1.15/η₁, y es η₁ el rendimiento bruto de producción de energía eléctrica promedio de la UE).

⁷⁹ El término “centralizado” debe interpretarse aquí como “procedente de la red eléctrica”, pero no implica ningún posicionamiento sobre la participación de la generación distribuida en dicha red eléctrica.

⁸⁰ Y todas las combinaciones posibles entre ambas.

⁸¹ En la ref. (García-Casals X., 2006) puede encontrarse un estudio específico para el caso de los sistemas de refrigeración solar.

basados en energías renovables térmicas descentralizados.

Pero adicionalmente a estos factores, en un futuro muy próximo y asociados al desarrollo de las redes inteligentes, pueden aparecer factores adicionales tales como los mecanismos de mercado asociados a la gestión de la demanda, que hagan que la opción de electrificación completa del sector residencial resulte todavía más interesante y favorable frente a las opciones de energías renovables térmicas distribuidas.

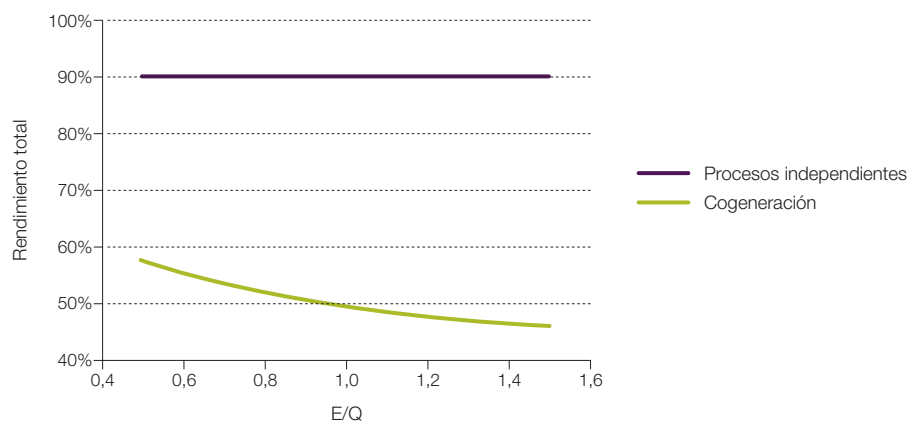
2.6.3.2 Cogeneración

Tradicionalmente hemos considerado la cogeneración⁸² o trigeneración⁸³ como un elemento ejemplar de eficiencia energética. Sin embargo, este concepto está estrechamente ligado a la forma convencional con la que producíamos electricidad y energía térmica final (calor y frío). En efecto, cuando la producción

de electricidad se basa principalmente en la conversión termoeléctrica de combustibles fósiles, y la producción de energía térmica final en la combustión directa de estos mismos combustibles, la cogeneración adquiere todo su sentido desde el punto de vista de la eficiencia para evitar el despilfarro de los combustibles fósiles.

La figura 25 nos ilustra este hecho. En esta figura, comparamos el rendimiento total del aprovechamiento del combustible fósil alcanzado al producir por un lado la electricidad (con un rendimiento del 35%), y por otro el calor (con un rendimiento del 85%), con el rendimiento total alcanzado al cubrir la demanda de electricidad y calor con una cogeneración en la que el rendimiento eléctrico del motor térmico se ha ajustado para proporcionar la relación electricidad / calor (E/Q) necesaria en cada caso, con unas pérdidas totales de la cogeneración del 10%, y bajo la hipótesis de que todo el calor residual producido puede aprovecharse, todo ello en función de

Figura 25. Rendimiento total asociado al uso de combustible para producir electricidad con 35% de rendimiento y calor con 85% de rendimiento, comparado con el de una cogeneración de rendimiento total igual al 90%.



⁸² Producción simultánea de electricidad y calor.
⁸³ Producción simultánea de electricidad, calor y frío.

la relación entre la demanda de electricidad y la de calor. Como podemos observar, existe una gran diferencia entre los rendimientos totales obtenidos por ambos métodos de cubrir las demandas de electricidad y calor en todo el rango de E/Q^{84} , y este es precisamente el motivo por el cual tradicionalmente hemos considerado la cogeneración como la abandonada de la eficiencia energética.

Evidentemente, las condiciones reales no son tan ideales como las que muestra la figura anterior. Por un lado está el hecho de que no tenemos a nuestra disposición un continuo de motores térmicos cuyo rendimiento eléctrico se adapte perfectamente al requerimiento de la estructura de la demanda (E/Q), por lo que el motor que acabamos usando en cada caso no es el ideal.

Otro elemento importante que empeora el comportamiento energético de la cogeneración es que a menudo no es posible aprovechar todo el calor residual producido en la generación de electricidad debido a que el acoplamiento de la demanda térmica y la capacidad de generación térmica asociada a la producción de electricidad, no es perfecto⁸⁵.

Pero además de todo lo anterior, en un sistema eléctrico con bajo coeficiente de emisiones (por introducción de renovables), y empleando equipamiento eficiente⁸⁶, la cogeneración puede incluso perder su sentido desde el punto de vista de la eficiencia energética por dejar de proporcionar ahorros de energía primaria.

En lo que sigue procedemos a justificar la afirmación del párrafo anterior, poniendo encima de la mesa los argumentos cuantitativos que nos obligan a replantearnos el papel de la cogeneración en un contexto E3.0, pasando de considerarla como uno de los estándares de

la eficiencia energética a verla como una tecnología que probablemente no adquiera un gran protagonismo en el marco de un sistema energético eficiente y basado en las energías renovables.

Indicadores de eficiencia de la cogeneración

En el campo de la cogeneración se emplean distintos indicadores para caracterizarla energéticamente⁸⁷, lo cual genera cierta confusión en relación a la eficiencia real de esta tecnología. Uno de ellos⁸⁸ es el empleado en el RD 661. La Directiva 2004/8/CE, para caracterizar la cogeneración de alta eficiencia emplea otro indicador⁸⁹.

A continuación presentamos los distintos indicadores empleados. De todos ellos solo dos son independientes, es decir, basta con proporcionar dos de ellos (por ejemplo E/Q y η_{tot}) para que queden determinados todos los demás.

A menudo se emplea alguno de estos indicadores para marcar la barrera entre lo que se considera cogeneración de alta eficiencia y lo que no⁹⁰. Pero incluso en las condiciones actuales conviene hacer un análisis crítico de lo que consideramos cogeneración de alta eficiencia.

En la Directiva 2004/8/CE se define como cogeneración de alta eficiencia aquella que proporcione un ahorro de energía primaria (PES) $\geq 10\%$, pero para el caso de la microcogeneración ($P_e < 50 \text{ kW}_e$) y la cogeneración de pequeña escala ($P_e < 1 \text{ MW}_e$), esta condición se relaja hasta PES $\geq 0\%$, es decir, se define en este caso la cogeneración de “alta eficiencia” como aquella que no represente una pérdida de energía primaria.

⁸⁴ La ventaja es mayor al crecer E/Q , pero hace falta emplear un motor térmico de mayor rendimiento para acoplarse a ese ratio entre las demandas eléctrica y térmica a medida que aumenta E/Q .

⁸⁵ En este sentido resulta ilustrativo analizar la estructura del RD 661 para el régimen especial, dentro del cual se engloba la cogeneración. En principio, la cogeneración que recibe prima por su generación eléctrica es la denominada de alta eficiencia, que en el marco del RD 661 se plasma en la exigencia de un rendimiento eléctrico equivalente mínimo (REE: ver más abajo). Pero para el caso de las aplicaciones en el sector edificación, y debido precisamente a la mayor dificultad de acoplar correctamente la demanda térmica con la capacidad de generación térmica asociada a la producción eléctrica, esta exigencia se relaja, y no exige en la práctica el cumplimiento de ningún valor del REE mínimo.

⁸⁶ Por ejemplo bombas de calor de buenas prestaciones.

⁸⁷ En (García-Casals X., octubre 2003) se encuentra un análisis del tipo de indicadores a usar para caracterizar la cogeneración desde la perspectiva de sostenibilidad.

⁸⁸ REE: Rendimiento eléctrico equivalente.

⁸⁹ PES: Ahorro de energía primaria.

⁹⁰ En la pequeña cogeneración ($P_e < 1 \text{ MW}_e$), los límites para definir la alta eficiencia (tanto en RD 661 como en Directiva 2004/8/CE) se relajan.

Para el caso del RD 661 se considera cogeneración de alta eficiencia (para poder acogerse al régimen especial) aquella que alcance un valor mínimo del promedio anual del REE, que por ejemplo para la cogeneración con motores térmicos y gas natural es del 55%, relajándose la exigencia para $P_e \leq 1 \text{ MW}_e$ hasta 49,5% en este caso, que ya es inferior al rendimiento de un ciclo combinado para producción de electricidad, y se elimina por completo la exigencia para el caso de aplicaciones en el sector edificación.

Algunos de los indicadores empleados hay que tomarlos con pinzas, pues son indicadores parciales que contemplan solo una parte de la realidad del proceso global de cogeneración, por lo que según los valores adoptados pueden carecer de sentido. Este es el caso de los rendimientos equivalentes REE⁹¹ y RTE. Por ejemplo, el REE tiende a infinito cuando el rendimiento eléctrico de referencia tiende al cociente entre electricidad producida y fuel consumido ($\text{REE} \rightarrow \infty$ para $\eta_{e,\text{ref}} \rightarrow E/F$), y el rendimiento térmico equivalente tiende a infinito cuando el rendimiento de referencia en generación de calor tiende al cociente entre calor útil producido y combustible consumido ($\text{RTE} \rightarrow \infty$ para $\eta_{h,\text{ref}} \rightarrow Q/F$)⁹².

Un elemento fundamental en la evaluación del grado de eficiencia de la cogeneración son las tecnologías de comparación que se emplean para la producción por separado de electricidad y calor. Según las tecnologías de comparación que se empleen, la cogeneración puede resultar ventajosa o no desde el punto de vista del ahorro de energía primaria, y en el marco de este estudio en el que se considera la evolución del sistema energético desde un contexto BAU a un contexto E3.0, si algo cambia de forma radical son las tecnologías de comparación. Por tanto, una cogeneración que podría estar justificada desde un punto

de vista de eficiencia energética en un contexto BAU, puede pasar a estar totalmente injustificada desde esa perspectiva en un contexto E3.0.

Las tecnologías de comparación se definen por los rendimientos de referencia de generación de calor⁹³ ($\eta_{h,\text{ref}}$) y electricidad⁹⁴ ($\eta_{e,\text{ref}}$), y evolucionan a lo largo del tiempo⁹⁵.

A continuación recogemos la expresión de distintos parámetros empleados para caracterizar energéticamente la cogeneración:

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{E + Q}{F}$$

$$\text{REE} = \frac{E}{F - \frac{Q}{\eta_{h,\text{ref}}}} = \frac{EQ}{\frac{1}{QF} - \frac{1}{\eta_{h,\text{ref}}}}$$

$$\text{RTE} = \frac{Q}{F - \frac{E}{\eta_{e,\text{ref}}}} = \frac{1}{\frac{1}{QF} - \frac{EQ}{\eta_{e,\text{ref}}}}$$

$$\text{PES} = 1 - \frac{1}{\frac{QF}{\eta_{h,\text{ref}}} + \frac{EF}{\eta_{e,\text{ref}}}} = 1 - \frac{F}{\frac{Q}{\eta_{h,\text{ref}}} + \frac{E}{\eta_{e,\text{ref}}}} = \frac{F_{\text{ref}} - F}{F_{\text{ref}}}$$

$$\eta_e = \frac{E}{F} \quad ; \quad \eta_h = \frac{Q}{F}$$

Siendo:

E: Producción de electricidad.

F: Consumo de combustible.

η_e : Rendimiento eléctrico.

$\eta_{e,\text{ref}}$: Rendimiento eléctrico de referencia (también Ref E).

η_h : Rendimiento térmico.

$\eta_{h,\text{ref}}$: Rendimiento térmico de referencia (también Ref H).

η_{tot} : Rendimiento total.

Q: Producción de calor.

REE: Rendimiento eléctrico equivalente.

RTE: Rendimiento térmico equivalente.

PES: Ahorro de energía primaria.

⁹¹ El REE, tal y como hemos comentado anteriormente, es el indicador empleado por la regulación española (RD 661).

⁹² En estas expresiones, la flecha ($\rightarrow$) significa: "tiende a", y el símbolo ∞ significa "infinito". Más abajo se aclara la definición de los distintos términos referidos en esta afirmación.

⁹³ En nomenclatura de la Directiva 2004/8/CE y del RD 661 este rendimiento se expresa como Ref H.

⁹⁴ En nomenclatura de la Directiva 2004/8/CE y del RD 661, este rendimiento se expresa como Ref E.

⁹⁵ Actualmente estos rendimientos de referencia se encuentran fijados a nivel comunitario en la Decisión de la Comisión de 21 de diciembre de 2006 (2007/74/CE) como los valores de eficiencia armonizados para la producción por separado de electricidad y calor. Por ejemplo, para la producción de electricidad, se establece un valor de estos rendimientos hasta el año 2011 del 52.5% al usar gas natural, y del 25% al usar biomasa. Para el caso de la producción de calor con gas natural, se establece un valor del 82%.

Dado que REE y RTE pueden tender a infinito, no resultan indicadores adecuados para analizar la eficiencia energética de la cogeneración. El indicador adecuado para este análisis es el PES con unos $\eta_{h,ref}$ y $\eta_{e,ref}$ correspondientes al sistema alternativo de producir Q y E con el fuel empleado para la cogeneración⁹⁶.

Procesos de comparación

Como ya hemos comentado, los procesos de comparación para generación de calor y electricidad son un elemento fundamental para evaluar la eficiencia de la cogeneración desde el punto de vista del ahorro de energía primaria que proporciona. En la regulación nacional y comunitaria (Directiva 2004/8/CE y RD 661) se emplean unos valores de los rendimientos energéticos de los procesos de comparación⁹⁷ que pretenden ser representativos de la situación actual, por lo que respecta a las tecnologías a las que sustituye la cogeneración. Pero estos procesos de comparación de referencia usados por la regulación actual pueden resultar totalmente inapropiados para evaluar la eficiencia energética de la cogeneración en un contexto distinto, como es incluso el contexto BAU en 2050, pero muy especialmente el contexto E3.0. En efecto, el cambio de planteamiento en el contexto E3.0 es tan radical respecto a la situación actual, que los procesos de comparación actuales no proporcionan ninguna indicación del impacto real de la cogeneración desde el punto de vista del ahorro de energía primaria.

Habitualmente, los procesos de comparación se definen partiendo de la base que se empleara para el mismo combustible en la cogeneración que en los procesos de referencia⁹⁸. En estas condiciones, el ahorro de

energía primaria se obtiene comparando el combustible empleado en la cogeneración para cubrir las demandas de electricidad (E) y calor (Q) con el rendimiento total de la cogeneración⁹⁹:

$$F \rightarrow \eta_{tot} \rightarrow E \text{ \& \& Q}$$

Con el combustible que sería preciso emplear para cubrir estas demandas basándose en los rendimientos de referencia de producción de electricidad y calor:

$$F_e = E/\eta_{e,ref} \rightarrow E$$

$$F_q = Q/\eta_{h,ref} \rightarrow Q$$

$$F_{ref} = F_e + F_q$$

En el caso de emplear una bomba de calor alimentada con electricidad como proceso de referencia, tecnología extensamente empleada en el contexto E3.0, en el caso de que la electricidad empleada por la bomba de calor proceda de una central termoeléctrica alimentada por un combustible¹⁰⁰, hay parte del combustible de dicha central que se pierde por no cogenerar, pero a cambio, en el punto de uso final, se emplea calor de origen solar del ambiente por estar usando una bomba de calor. De alguna forma puede considerarse como que ese calor que se pierde en la central termoeléctrica se recupera con creces en el punto de consumo a través del calor ambiente. De hecho, el calor útil obtenido por aprovechamiento del calor ambiente que nos proporciona la bomba de calor es por lo general muy superior al calor útil obtenido mediante la cogeneración, pero en la cogeneración además se obtiene electricidad. El balance completo lo expresa el PES de la cogeneración empleando como procesos de comparación el rendimiento del sistema eléctrico (mejora al aumentar penetración renovables) y el de producción de calor con bomba calor a partir del combustible ($\eta_{e,ref}.COP$). En el

⁹⁶ En el caso de emplear bombas de calor para la producción de calor como sistema de referencia, tendríamos $\eta_{h,ref} = COP \times \eta_{e,ref}$. Se puede añadir el efecto pérdidas T&D tal y como hace la Directiva mediante la reducción del rendimiento eléctrico de referencia.

⁹⁷ Cabe pensar en dos opciones de proceso de comparación: la tecnología a la que sustituye la cogeneración desarrollada, o la media del sistema energético actual. La regulación energética actual considera la segunda de estas opciones.

⁹⁸ Lo cual ya constituye una restricción importante a la hora de evaluar el efecto neto sobre el ahorro de energía primaria, pues los procesos de referencia reales, es decir, aquellos que se emplearían si no se cogenerara, pueden hacer uso de combustibles o tecnologías energéticas distintas.

⁹⁹ Las flechas en las expresiones siguientes significan: "tiene a".

¹⁰⁰ Lo cual podría aplicar a un contexto BAU, pero no a uno E3.0.

caso de la producción de frío, la comparativa todavía es más favorable al proceso vía bomba calor, pues con la trigeneración, la máquina absorción puede tener $COP < 1$ (aprovecha menos calor residual que para producir calor)¹⁰¹.

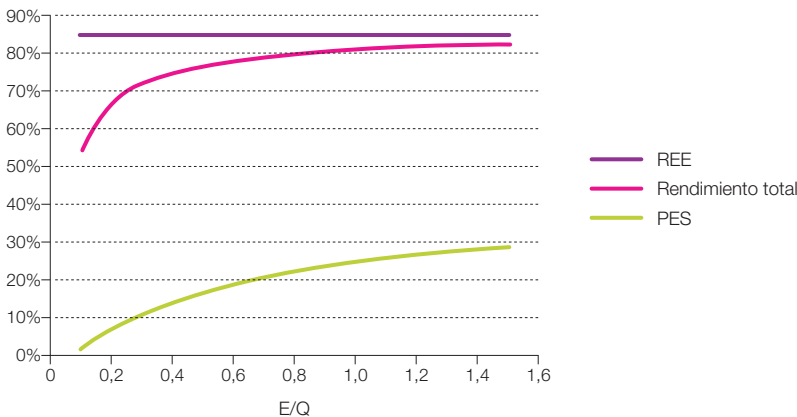
Pero como comentábamos anteriormente, la restricción de imponer en los procesos de comparación que se emplee el mismo combustible para generar la electricidad que el usado en la cogeneración, es excesiva, y resulta inapropiada para el análisis en un contexto global (como es el E3.0). En efecto, incluso en el contexto actual la electricidad se produce de forma creciente con fuentes de energía renovable no combustibles, y en el contexto E3.0 prácticamente toda la electricidad se produce sin emplear combustibles. En estas condiciones, el $\eta_{e,ref}$ tiende al 100%, lo que hace que la cogeneración cada vez resulte menos ventajosa, hasta el punto de que la cogeneración incluso llegue a resultar negativa ($PES < 0\%$).

Variaciones tipo de los parámetros que caracterizan la eficiencia de la cogeneración

Para ilustrar los comentarios anteriores, recogemos a continuación los rangos de variación tipo de los distintos parámetros empleados para caracterizar energéticamente a la cogeneración.

La figura 26 nos muestra la variación de los parámetros que caracterizan energéticamente la cogeneración para unos procesos de comparación que podríamos considerar representativos de la situación actual ($\eta_{h,ref} = 90\%$ y $\eta_{e,ref} = 50\%$)¹⁰² al emplear una instalación de cogeneración con un rendimiento total del 85%, y en función de la estructura de la demanda energética caracterizada por su relación electricidad / calor¹⁰³. Como podemos observar, en estas condiciones el PES se mantiene positivo en todo el rango de estructuras de demanda consideradas, y llega a alcanzar valores su-

Figura 26. Variación de los distintos indicadores energéticos de una cogeneración con 85% de rendimiento total con la estructura de la demanda (E/Q) cuando se emplean como procesos de comparación $\eta_{h,ref} = 90\%$ y $\eta_{e,ref} = 50\%$.



101 Una máquina de absorción de simple efecto tiene $COP \approx 0,7$, mientras que una máquina de doble efecto nos proporciona $COP \approx 1,3$.

102 Nótese que estos valores, a pesar de ser representativos de la situación actual, son algo superiores a los que impone la regulación actual (2004/8/CE y RE661), lo cual hace que la regulación tienda a sobrevalorar los beneficios energéticos de la cogeneración.

103 Al igual que en el caso anterior, se asume una cogeneración ideal en el sentido de que para cada valor de E/Q la estructura de la generación del motor térmico empleado se acopla perfectamente a la demanda.

periores al 20% para valores elevados de E/Q. En estas condiciones, la cogeneración realmente constituye una tecnología energéticamente eficiente en relación a los procesos de comparación empleados.

En la figura 27 presentamos los resultados correspondientes a la introducción de bombas de calor eficientes¹⁰⁴ como tecnología de comparación para la producción de calor¹⁰⁵. Incluso en el caso de que respecto al ejemplo

Figura 27. Variación del REE y el PES de una cogeneración con 90% de rendimiento total en función de la estructura de la demanda (E/Q) cuando se emplean como procesos de comparación $\eta_{e,ref} = 40\%$ y bombas de calor con COP = 6.32.

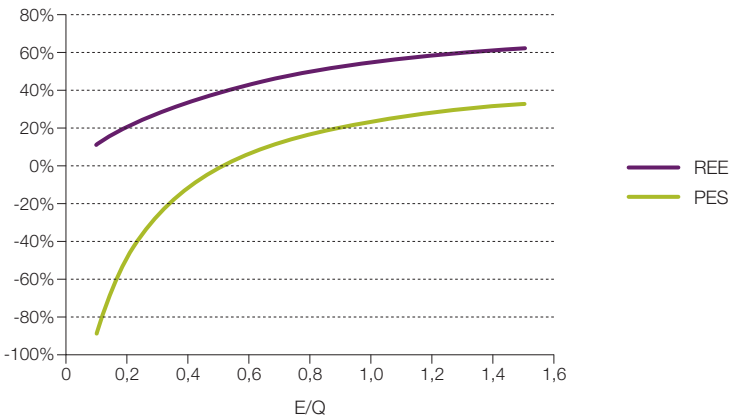
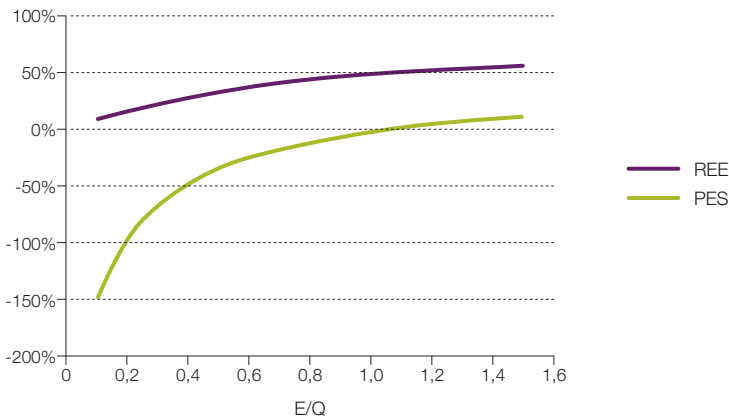


Figura 28. Variación del REE y el PES de una cogeneración con 85% de rendimiento total en función de la estructura de la demanda (E/Q) cuando se emplean como procesos de comparación $\eta_{e,ref} = 50\%$ y bombas de calor con COP = 6.32.



104 La bomba de calor que consideramos en estos ejemplos, con un COP = 6.32, es considerablemente más eficiente que las bombas de calor domésticas que encontramos actualmente en el mercado español, pero se corresponde con el estándar japonés de bombas de calor domésticas para 2010 (si bien aquí consideramos ese COP como valor medio estacional), y por tanto es indicativo de la tecnología eficiente actualmente disponible. En España, el RD 142/2003 es el que regula el etiquetado energético de los acondicionadores de aire de tipo doméstico, y para los equipos refrigerados por aire (sistemas aire-aire) asigna la clase-A para COP > 3.6 en el caso de equipos split, para COP > 3.4 para equipos compactos, y para COP > 3.0 para equipos de conducto único. En el caso de plantearse el uso de refrigeradoras centralizadas por bloque o por distrito, en configuraciones agua-agua, sería posible acceder a COP > 7 (algunas enfriadoras eficientes, a carga parcial, ya alcanzan COP > 10).

105 Nótese que, en estas condiciones, el rendimiento de referencia de la producción de calor es de $\eta_{ref} = 253\%$.

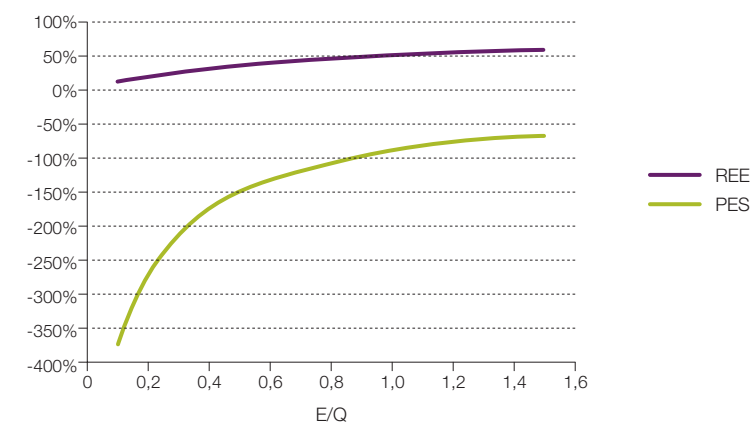
anterior mejorara el rendimiento total de la generación hasta alcanzar el 90%, y empeorara el rendimiento del proceso de comparación para la generación eléctrica hasta el 40%, esta figura nos muestra cómo para valores de E/Q inferiores al 50%, el ahorro de energía primaria que nos proporciona esta cogeneración se hace negativo. Para el caso¹⁰⁶ de mantener los mismos valores que en el ejemplo anterior ($\eta_{e,ref} = 50\%$ y $\eta_{tot} = 85\%$), la figura 28 nos muestra cómo el PES es negativo para $E/Q < 1$, es decir, prácticamente para cualquier caso. En este contexto, la cogeneración en raras ocasiones resulta ventajosa desde el punto de vista de la eficiencia energética, por lo que en general no la podremos considerar como una tecnología eficiente. Y para el caso de que tengamos un sistema eléctrico basado en energías renovables distintas de la biomasa, con un $\eta_{e,ref} = 100\%$, incluso con una cogeneración de $\eta_{tot} = 90\%$, la figura 29 nos muestra cómo de negativa resulta la cogeneración en términos de energía primaria para todo el rango de E/Q.

Pero es más, incluso en el contexto BAU la penetración de renovables en el sistema eléctrico irá aumentando con el tiempo, y en el contexto E3.0 esta penetración de las renovables será mucho más rápida, de tal forma que la práctica totalidad de electricidad se producirá a partir de fuentes renovables¹⁰⁷ no combustibles, con lo que el $\eta_{e,ref}$ irá tendiendo a infinito¹⁰⁸. A medida que aumenta el $\eta_{e,ref}$, el PES proporcionado por una cogeneración va reduciéndose, por lo que a partir de una cierta integración de renovables en la red la cogeneración resultará una tecnología negativa desde el punto de vista de la eficiencia energética por proporcionar $PES < 0$ tal y como nos muestra la figura 30. En efecto, para una cogeneración de 90% de rendimiento total, cuando el proceso de referencia para la producción de calor es una bomba de calor eficiente ($COP = 6.3$), a partir de un rendimiento eléctrico de referencia de $\eta_{e,ref} \approx 50\%$ la cogeneración ya no tendría sentido¹⁰⁹ desde el punto de vista de la eficiencia. Para el caso de emplear una

106 Nótese que, en estas condiciones, el rendimiento de referencia de la producción de calor es de $\eta_{e,ref} = 316\%$.

107 Es de notar que la definición del rendimiento del sistema eléctrico para el caso de las renovables distintas a la biomasa es un tanto artificial. En efecto, para los casos de los combustibles fósiles o de la biomasa, el rendimiento se define empleando para el denominador la energía química contenida en el combustible, que constituye ya el recurso energético procesado del que disponemos al iniciar el proceso de transformación dentro del sistema energético. Sin embargo, para tecnologías como la eólica o las solares, se suele considerar la electricidad generada a partir de dichos recursos energéticos renovables como el recurso energético ya procesado que introducimos en el sistema energético. Evidentemente podríamos remontarnos más arriba en la cadena de transformaciones energéticas de esos recursos renovables, pero carece de sentido práctico. En efecto, si consideramos la eólica, podríamos tomar como denominador la energía mecánica contenida en el viento que es del orden del doble de la electricidad producida por el aerogenerador (aunque esto no se puede interpretar como una pérdida porque si el rotor del aerogenerador frenara completamente al viento la potencia extraída sería nula, puesto que dejaría de fluir viento por el rotor), o bien la energía solar que en origen dio lugar a esa energía mecánica contenida en el viento con lo que la "eficacia" del proceso de conversión sería todavía mucho más bajo, o bien yendo más lejos la energía nuclear original que en el sol dio lugar a la radiación solar que generó la energía mecánica del viento, con lo que la "eficacia" todavía sería mucho más baja. Pero ninguna de estas "eficacias" tienen sentido práctico alguno, pues el recurso energético procesado que nosotros introducimos en el sistema energético es la electricidad producida por el aerogenerador. En el caso de la biomasa, el rendimiento de conversión de la misma que consideramos tiene como denominador la energía química contenida en la biomasa original, que es lo que consideramos energía primaria introducida en el sistema energético y por tanto el

Figura 29. Variación del REE y el PES de una cogeneración con 90% de rendimiento total en función de la estructura de la demanda (E/Q) cuando se emplean como procesos de comparación $\eta_{e,ref} = 100\%$ y bombas de calor con $COP = 6.32$.



bomba de calor menos eficiente, como las actualmente disponibles en el mercado español¹¹⁰, la situación es un poco más favorable para la cogeneración, pero la conclusión principal es la misma, pues tal y como

nos muestra la figura 31 la cogeneración carece de sentido desde un punto de vista energético a partir de $\eta_{e,ref} \approx 60\%$ para cualquier aplicación, y a partir de $\eta_{e,ref} \approx 50\%$ para muchas aplicaciones.

Figura 30. Efecto del rendimiento eléctrico de referencia ($\eta_{e,ref}$) sobre el ahorro de energía primaria producido por una cogeneración con rendimiento total del 90%, al usar como proceso de referencia para la generación de calor una bomba de calor con COP = 6.3.

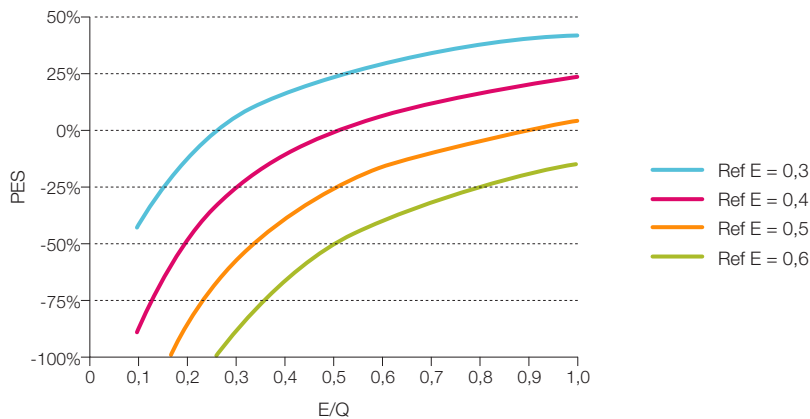
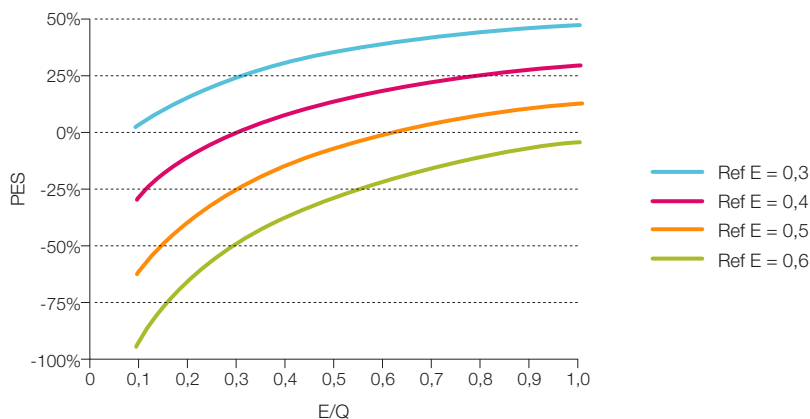


Figura 31. Efecto del rendimiento eléctrico de referencia ($\eta_{e,ref}$) sobre el ahorro de energía primaria producido por una cogeneración con rendimiento total del 90%, al usar como proceso de referencia para la generación de calor una bomba de calor con COP = 3.6.



recurso energético cuyas eficiencias de transformación hay que perseguir. Pero en origen, esa biomasa es la radiación solar, que con un rendimiento del orden del 0.5% se convierte en biomasa, por lo que si siguiéramos aguas arriba el proceso de transformación energética, el rendimiento que adoptaríamos para la transformación eléctrica de la biomasa sería muy inferior al que consideramos. Y con los combustibles fósiles pasa exactamente lo mismo, pues en origen provienen de la biomasa, pero con rendimiento aguas arriba de la energía química almacenada en el combustible inferior a los de la biomasa.

108 El η_e del sistema eléctrico tenderá al 100% si adoptamos como denominador la energía eléctrica aportada por las tecnologías renovables (excluyendo la biomasa vía termoelectrónica, cuyo rendimiento sería inferior), pero tenderá a infinito si el denominador es el combustible fósil, que es el caso adecuado para definir el $\eta_{e,ref}$ de cara a la cogeneración.

109 Nótese que este rendimiento es inferior al que nos proporciona un ciclo combinado actual operando con gas natural, incluso sin participación de las renovables en el sistema eléctrico.

110 Según el RD 142/2003, que regula el etiquetado energético de los acondicionadores de aire de tipo doméstico, la clase-A se alcanza para equipos *split* refrigerados por aire a partir de COP > 3.6, y para equipos compactos refrigerados por agua para COP > 4.7. En el caso de implementar refrigeradoras centralizadas a nivel de bloque o de distrito, refrigeradas por agua y alimentando un circuito de agua enfriada, el COP al que se podría optar sería COP > 7.

Para ilustrar más la evolución asociada a la mejora en el $\eta_{e,ref}$, en las figuras 32,33 y 34 mostramos cómo evoluciona el PES en función del $\eta_{e,ref}$ para una cogeneración con el 90% de rendimiento total y para cuatro casos

de procesos de comparación de generación térmica: caldera con rendimiento estacional del 80%, bomba de calor con COP = 3.5 y bomba de calor con COP = 6.3, y para tres procesos distintos indicados por el ratio entre

Figura 32. Efecto del $\eta_{e,ref}$ sobre el ahorro de energía primaria para una cogeneración con el 90% de rendimiento total cuando consideramos un proceso de referencia para la generación de calor con una caldera de $\eta_{h,ref} = 80\%$.

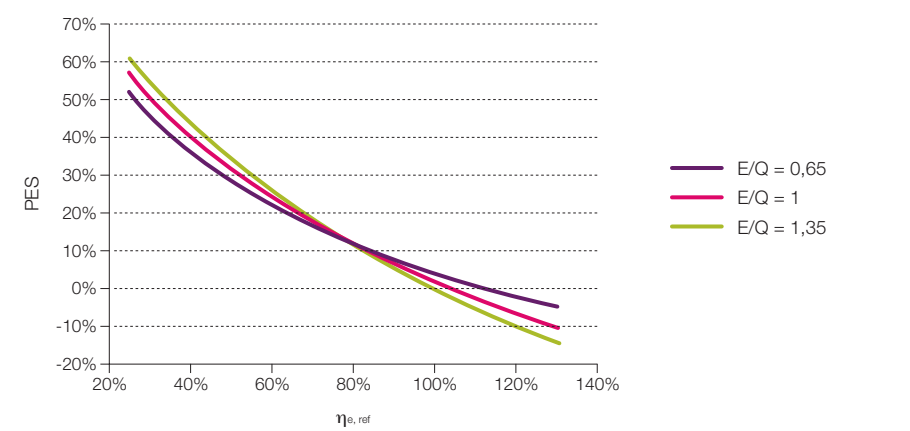


Figura 33. Efecto del $\eta_{e,ref}$ sobre el ahorro de energía primaria para una cogeneración con el 90% de rendimiento total cuando consideramos un proceso de referencia para la generación de calor con una bomba de calor de COP = 3.5.

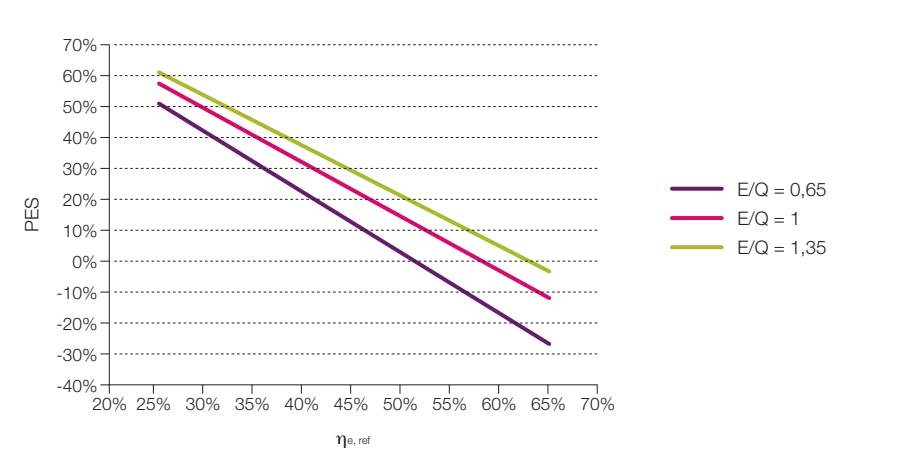
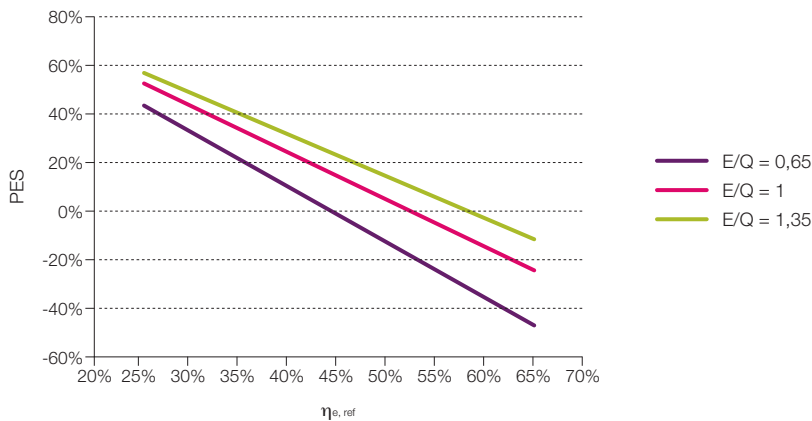


Figura 34. Efecto del $\eta_{e,ref}$ sobre el ahorro de energía primaria para una cogeneración con el 90% de rendimiento total cuando consideramos un proceso de referencia para la generación de calor con una bomba de calor de COP = 6.3.



las demandas eléctrica y térmica (E/Q). Como podemos observar, para todos los casos el ahorro de energía primaria se va reduciendo al aumentar¹¹¹ el $\eta_{e,ref}$, hasta llegar a hacerse negativo para una valor del $\eta_{e,ref}$ tanto más bajo cuanto más eficiente sea el proceso de referencia para generación de calor. Es de resaltar cómo incluso para el caso de emplear el efecto Joule para calefactar ($COP = 1$), el PES se hace negativo para $\eta_{e,ref} \geq 90\%$ (para este caso con una cogeneración de $\eta_{tot} = 90\%$), y en un escenario de elevada penetración renovable en el sistema eléctrico, valores de $\eta_{e,ref} = 90\%$ se alcanzan en muy pocos años como veremos a continuación.

Escenarios evolución del $\eta_{e,ref}$ del sistema eléctrico

En estas condiciones resulta interesante explorar el ritmo de evolución del $\eta_{e,ref}$ del sistema eléctrico peninsular, definido como cociente entre la electricidad producida y el combustible utilizado¹¹², a medida que se van

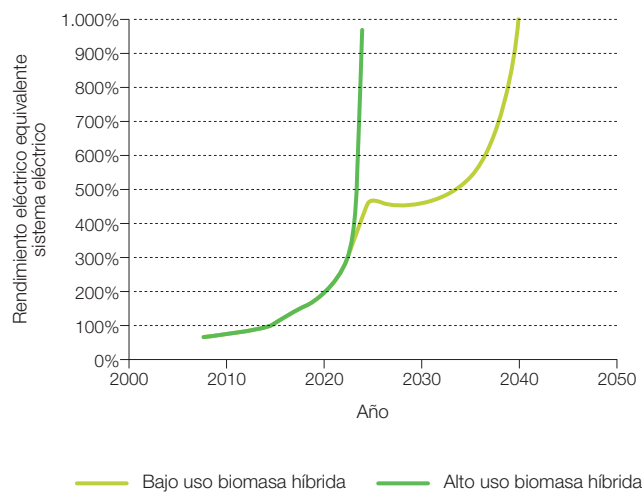
integrando energías renovables. Con este propósito hemos procesado los resultados presentados en los escenarios de introducción de renovables hasta el año 2050 desarrollados en (García-Casals X., 2009: info Fund. Ideas).

La figura 35 nos muestra la evolución del rendimiento eléctrico equivalente del sistema eléctrico peninsular, definido como cociente entre la electricidad producida y el uso de combustible empleado, para los dos escenarios de sustitución de las centrales nucleares y de combustible fósil desarrollados en (García-Casals X., 2009). Este rendimiento eléctrico equivalente es el resultante del sistema de generación eléctrica peninsular excluyendo la generación nuclear y la generación con biomasa. En ambos escenarios el fin del cierre de las centrales nucleares tiene lugar en el año 2016, y el uso de combustibles fósiles se prolonga hasta el año 2043 para el escenario con bajo uso de la biomasa híbrida, como consecuencia del pico de la demanda experimentado en torno al año 2030 y de la

111 Conviene recordar, una vez más, que a medida que se van integrando renovables en el sistema eléctrico, el $\eta_{e,ref}$ tiende a infinito, pues la cantidad de combustible empleada para generar electricidad va tendiendo a cero. De acuerdo con los balances de la AIE para España, eliminando el efecto de la energía nuclear, nuestro sistema eléctrico en su conjunto ya tenía un $\eta_{e,ref} = 51\%$. Para la aplicación de la Directiva 2004/8/CE, en el caso de emplear gas natural, tenemos $\eta_{e,ref} = 52.5\%$.

112 Como indicábamos anteriormente, el rendimiento del sistema eléctrico tiende al 100% al integrar renovables si para el denominador de dicho rendimiento consideramos la electricidad generada a partir de fuentes renovables (distinta a la biomasa). Sin embargo, desde el punto de vista de la comparación con la cogeneración, donde lo relevante es el uso que se hace del combustible empleado como entrada en el proceso de cogeneración (sea combustible fósil o biomasa), el denominador del rendimiento del sistema eléctrico parece más coherente definirlo como el combustible empleado en el sistema eléctrico. En estas condiciones, el rendimiento equivalente del sistema eléctrico tiende a infinito a medida que la generación eléctrica tiende a un 100% renovables con predominio de las otras fuentes renovables distintas a la biomasa. Evidentemente, estos valores superiores al 100% no se pueden interpretar como un rendimiento en su concepto convencional, pero sí como la eficacia en el uso de combustibles con la que el sistema eléctrico genera la electricidad, que tiende a infinito a medida que el sistema eléctrico se independiza del uso de combustibles. Es por este motivo que la comparativa con la cogeneración (proceso integrado de uso de los combustibles) se hace tan desfavorable para ésta, a medida que la generación eléctrica alternativa al proceso de cogeneración va a requerir una menor participación de los combustibles.

Figura 35. Evolución del rendimiento eléctrico equivalente del sistema eléctrico peninsular, definido como cociente entre la electricidad producida y el combustible utilizado, para los escenarios de evolución del sistema eléctrico desarrollados en (García-Casals X., 2009).



elección de no sobredimensionar el mix de generación renovable respecto a la demanda proyectada para el año 2050, o hasta el año 2025 en el caso de hacer un uso más extenso de la hibridación con biomasa para cubrir el pico de demanda en los años centrales del escenario. Como podemos ver, en ambos escenarios se supera el valor de $\eta_{e,ref} = 100\%$ antes del año 2015, prosiguiendo el crecimiento de dicho parámetro, incluso con tasas superiores en los años siguientes. Los valores del $\eta_{e,ref}$ a partir de los cuales veíamos más arriba que la cogeneración ya no tenía sentido al emplear bombas de calor para cubrir la demanda térmica (50-60%) ya se alcanzan desde el principio de los escenarios (momento actual), y el valor de $\eta_{e,ref}$ a partir del cual incluso al emplear calefacción eléctrica por efecto Joule resulta más favorable que la cogeneración (90%) no queda muy lejano. Por tanto, en este contexto, difícilmente puede considerarse la cogeneración como

una tecnología relevante desde el punto de vista de la eficiencia.

Planteamientos y conclusiones respecto a la participación de la cogeneración en un contexto E3.0

De acuerdo con los resultados presentados podemos concluir en primer lugar que bajo la perspectiva de un contexto E3.0 hay que abandonar la idea asociada a los contextos BAU de que la cogeneración constituye una tecnología de elevada eficiencia en general. A pesar de esto es posible que la cogeneración pueda jugar un papel relevante en la transición hacia el contexto E3.0 y dentro de ciertas aplicaciones, pero su idoneidad para una aplicación determinada debe ser analizada de forma crítica, y huir del tópico actual de que la cogeneración es buena per se. Por tanto, de cualquier forma, cabe esperar que

la participación de la cogeneración bajo este contexto sea significativamente inferior a la proyectada en los escenarios de eficiencia desarrollados en el pasado, e incluso su planteamiento de operación más eficiente puede verse modificado respecto al actual¹¹³.

Revisemos con algo más de detalle algunos de estos conceptos. Los puntos clave a tener en cuenta para analizar si la cogeneración constituye una tecnología apropiada para el sistema energético son los siguientes:

- En un contexto E3.0 donde la generación eléctrica está ampliamente dominada por el uso de tecnologías renovables en modo regulación, la opción más eficiente para producir calor es el uso de la electricidad residual¹¹⁴ del sistema de generación eléctrica generable, con fuentes renovables no acumulables (no biomasa, no hidroeléctrica regulable). En efecto, el coste principal de esa electricidad corresponde a la inversión para instalar la potencia, y es un coste en el que ya se ha incurrido se use o no esa electricidad. Por tanto, podemos considerar esa electricidad como de coste prácticamente nulo, por lo que su uso para cubrir la demanda térmica es sin duda alguna la opción más eficiente desde el punto de vista técnico y económico. En el caso de aplicaciones térmicas de baja temperatura el uso más eficiente de esa electricidad con fines térmicos es mediante bombas de calor. Para el caso de aplicaciones de mayor temperatura, el efecto Joule directo según esa electricidad residual sigue siendo la mejor opción para cualquier valor del $\eta_{e,ref}$.
- Cuando la electricidad a emplear no es electricidad "residual" que se disiparía por requerimientos de regulación, la cogeneración basada en combustibles fósiles deja de quedar justificada desde un punto de vista

de eficiencia energética a partir del momento en el que el sistema eléctrico supere un cierto valor del $\eta_{e,ref}$, valor umbral que es tanto más bajo cuanto más eficiente sea la tecnología eléctrica empleada para cubrir la demanda térmica. Así, al emplear bombas de calor de alta eficiencia (COP $\approx$ 6.3), el valor límite del $\eta_{e,ref}$ a partir del cual deja de estar justificada la cogeneración es de 45-50%, es decir, menor al actual del sistema eléctrico, por lo que ahora mismo ya no quedaría justificada la cogeneración. Si las bombas de calor que empleamos son menos eficientes (COP $\approx$ 3.5), el valor límite del $\eta_{e,ref}$ a partir del cual deja de estar justificada la cogeneración es de 55-65%, es decir, del orden del actual del sistema eléctrico, por lo que en muy corto plazo, a medida que se siguen integrando renovables en la red eléctrica, dejaría de quedar justificada la cogeneración. E incluso para esas aplicaciones en que no se pueda recurrir a una bomba de calor¹¹⁵ y la opción eléctrica para cubrir la demanda térmica sea el efecto Joule directo, la cogeneración deja de quedar justificada desde un punto de vista de eficiencia al superar valores del $\eta_{e,ref}$ del orden del 90%, valor que quedaría superado en torno al año 2014 para los escenarios de introducción de renovables presentados en (García-Casals X., 2009).

- En los puntos anteriores considerábamos electricidad generada con renovables no combustibles, es decir, renovables distinta a la biomasa. El uso de biocombustibles en cogeneración será siempre más eficiente que su uso en centrales termoeléctricas que no aprovechen el calor residual del ciclo de potencia¹¹⁶. Esto incluye el uso de combustibles derivados de la biomasa para hibridar centrales termosolares. Sin embargo, tal y como mostramos en (GP, 2007), la hibridación de centrales termosolares con biomasa

¹¹³ Actualmente, una cogeneración, para ser eficiente debe ser operada siguiendo a la demanda térmica.

¹¹⁴ Ver (GP, 2007) para una cuantificación de la gran cantidad de electricidad "residual" al operar un sistema de generación eléctrica basado en renovables.

¹¹⁵ Por restricciones de espacio cuando se trata de demanda térmica de baja temperatura como en el sector edificación, o por condiciones térmicas al tratarse de demanda térmica de media o alta temperatura en el sector industrial

¹¹⁶ En principio, cualquier central termoeléctrica es susceptible de cogenerar, pero para ello es preciso que se encuentre emplazada cerca de una demanda de energía térmica que se acople bien con su capacidad de generación eléctrica.

constituye una herramienta de regulación fundamental y de bajo coste para poder operar un sistema 100% renovable con una demanda "ciega" a las necesidades y capacidades del sistema de generación, por lo que en este contexto el uso de la biomasa para generación eléctrica quedaría supeditado, en primer lugar a las necesidades de regulación, y en segundo lugar a las consideraciones de eficiencia¹¹⁷. Sin embargo, en un contexto E3.0 donde la demanda participa de forma activa en la regulación del sistema eléctrico y responde a las necesidades de éste, el papel fundamental que jugaba la hibridación termosolar con biomasa en (GP, 2007) pasa a ser mucho menos importante o incluso a desaparecer, por lo que las consideraciones de eficiencia energética en el uso del recurso biomasa priorizarían la aplicación de la biomasa en instalaciones de cogeneración. Sin embargo, incluso en estas condiciones, el uso de la biomasa para la operación del sistema eléctrico quedaría relegado a un segundo término¹¹⁸ cuando pudiera justificarse desde un punto de vista técnico y económico.

Con estos puntos clave en mente, el planteamiento para la cobertura de demanda térmica (sectores edificación e industria) y para el uso de la biomasa en estos sectores¹¹⁹ podría ser el siguiente:

1. Como primera opción para la cobertura de la demanda térmica usar la electricidad "residual" generada con renovables no acumulables (no biomasa ni hidroeléctrica regulada), vía bombas de calor para aplicaciones de baja temperatura y vía efecto Joule para aplicaciones de media / alta temperatura o para aquellas de baja temperatura que presenten restricciones para incorporar bombas de calor, junto con la aplicación de capacidad de acumulación térmica distribuida.

2. Como segunda opción emplear micro-cogeneración y cogeneración, en modo de operación de regulación de la generación eléctrica (potencia rodante sustitutoria de la hibridación termosolar). Sin embargo es preciso tener presente que éste es un modo de operación de la cogeneración distinto del actual (siguiendo demanda térmica), y su potencial de participación en el sistema energético depende y compite con la gestión de la demanda¹²⁰ para regulación eléctrica y con la cobertura de la demanda térmica anteriormente obtenida con electricidad residual. Por tanto, en este modo (factor de capacidad limitado) el coste del servicio de la cogeneración debe ser a priori bastante más elevado que el de la DSM/DSR. Por tanto, si bien en caso de que se den todas las condiciones (hueco demanda térmica en acumulación y requerimiento regulación eléctrica coincidentes) es más eficiente esta cogeneración que la hibridación termosolar (menores pérdidas, distribución eléctrica, aprovechamiento del calor residual, contribución a la regulación tensión red, integración en microred capaz operar en isla, etc.), es fácil que el CF resultante en las aplicaciones en el sector edificación¹²¹ sea tan bajo que este método de regulación resulte mucho más caro que la hibridación termosolar (que comparte todo bloque de potencia con termosolar, y que tiene una escala muy superior que conduce a menores costes específicos). Por el contrario, en el sector industria, la existencia de demanda térmica de media temperatura, junto con la estructura menos gestionable de la misma, y el buen complemento¹²² con el aprovechamiento de la electricidad "residual" desde el punto de vista de la integración del sistema energético, hacen que la cogeneración con biomasa se posicione como una tecnología apropiada que tan solo puede

117 Esto quiere decir que si el uso de la biomasa para hibridar una central termosolar proporciona mayor capacidad de regulación que su uso en una aplicación de cogeneración, el uso apropiado de la biomasa en estas condiciones sería para hibridar la central termosolar a pesar de presentar una menor eficiencia energética en el uso del recurso biomasa, pues la eficiencia del sistema energético total sería superior. Y dado que en un contexto de demanda "ciega" a las necesidades del sistema todo el peso de la regulación recae sobre la capacidad de generación, el uso centralizado de la biomasa en las centrales termosolares sería la solución más apropiada.

118 En efecto, dada la estructura del sistema energético en un contexto E3.0 por un lado, y las características de la biomasa por otro lado (capacidad de acumulación, requerimientos en otras aplicaciones energéticas no electrificables), el uso de la biomasa para generación de electricidad seguiría supeditado a las necesidades de regulación del sistema eléctrico, y en estas condiciones se limitan mucho más las posibilidades de las aplicaciones de cogeneración, pues se impone la importante restricción de que el calor residual pueda ser aprovechado (directamente o mediante acumulación) en los instantes en los que se requiere la operación de la planta de cogeneración desde el punto de vista de la regulación eléctrica. Es de notar que esto implica un cambio radical en el modo de operación de la cogeneración, desde el modo mandado por la demanda térmica (situación actual) hacia el modo mandado por la demanda eléctrica (o más específicamente los requerimientos de regulación del sistema eléctrico).

119 La aplicación de la biomasa en el sector transporte es independiente de las consideraciones de eficiencia de la cogeneración y queda gobernada por otro tipo de consideraciones.

120 DSM y DSR: DSM = demand side management (gestión de la demanda); DSR = demand side response (respuesta de la demanda). En la práctica ambos términos se usan a menudo para indicar el mismo concepto, pero el DSR hace más hincapié en el hecho de que la demanda responde a los requerimientos del sistema energético.

121 Pues la elevada electrificación

verse limitada por la disponibilidad del recurso biomasa¹²³.

3. Como tercera opción para la cobertura de la demanda térmica, estaría el uso de la solar térmica distribuida. En efecto, por costes no puede competir con la opción-1, y a diferencia de la opción-2 no tiene capacidad de contribuir a la regulación del sistema eléctrico. Por otro lado, la solar térmica puede jugar un papel relevante en el proceso de transición de un contexto BAU a uno E3.0, por lo que una vez ya instalada podría cubrir el posible nicho de la opción-2, y limitar por tanto todavía más los posibles usos de la cogeneración¹²⁴.

4. Finalmente, está la opción de usar la electricidad renovable no residual para cubrir la demanda térmica. Como hemos visto anteriormente, esta opción pasa a ser la más eficiente¹²⁵ a partir del momento en el que el sistema eléctrico supera un valor mínimo del $\eta_{e,ref}$ que se encuentra entre un 45% y un 90% según que se usen opciones eficientes de bomba de calor o elementos resistivos directos (efecto Joule) para cubrir la demanda térmica con electricidad. Dado que estos valores del $\eta_{e,ref}$ o bien ya se han superado o lo harán en breves años, por eficiencia esta opción entraría antes que la opción-2 (cogeneración). Adicionalmente, los bajos CF con los que podrían operar las opciones 2 y 3 en un contexto E3.0, junto con las economías de escala y elevados CF de las tecnologías de generación eléctrica basándose en renovables en este contexto, traen como consecuencia que desde un punto de vista de costes esta opción 4 desplace a las opciones 2 y 3.

Según todas estas consideraciones, y teniendo en cuenta que además la biomasa puede jugar un papel muy relevante en cubrir

ciertas aplicaciones del sector transporte, hemos decidido no considerar la cogeneración (ni basado en combustible fósil ni en biomasa) como una de las tecnologías participantes en el contexto E3.0 a largo plazo para la cobertura de la demanda térmica del sector edificación. Por el contrario, en el sector industrial sí que consideramos como una tecnología apropiada para el contexto E3.0 la cogeneración basada en biomasa y operada preferentemente desde el punto de vista de los requerimientos de regulación del sistema eléctrico, complementada por el aprovechamiento de la electricidad residual del sistema eléctrico para proporcionar la requerida garantía de cobertura de la demanda, y sometida a la limitación de no disparar el consumo de biomasa más allá de valores que parezcan razonables en términos relativos con el caso recurso disponible.

2.6.3.3 Solar térmica de baja temperatura

El uso de la energía solar térmica para cubrir la demanda térmica, ha sido habitualmente considerado como una de las tecnologías renovables prioritarias para potenciar su introducción. En efecto, la tecnología es aparentemente¹²⁶ sencilla, y sus rendimientos elevados en comparación con otras tecnologías renovables¹²⁷, por lo que el potencial de hacerse cargo de una gran fracción de la demanda térmica de baja y media temperatura a costes limitados es para la tecnología solar térmica muy importante.

Tanto es así, que en el campo de la edificación la regulación actual¹²⁸, desde el año 2006 obliga a incluir en los edificios una instalación solar térmica para cubrir una fracción entre¹²⁹ el 30% y el 70% de la demanda de ACS¹³⁰. En la figura 36 mostramos las prestaciones energéticas y económicas de una instalación

hacia la que tiende este sector en un contexto E3.0 deja muy poco hueco a la participación de la cogeneración.

122 En efecto, una aplicación de cogeneración basándose en biomasa complementada con el aprovechamiento de electricidad residual, representa una combinación muy adecuada desde el punto de vista de la integración del sistema energético. La cogeneración, comandada por los requerimientos de regulación del sistema eléctrico, opera a modo de regulación hacia arriba, mientras que el aprovechamiento de la electricidad "residual" del sistema eléctrico opera como regulación hacia abajo, complementándose muy bien ambos elementos para proporcionar la garantía requerida para la cobertura de la demanda del sector industrial con limitada capacidad de GDE.

123 Tal y como veremos más adelante en el desarrollo del escenario para el sector industria, si bien la cogeneración con biomasa participa en el mix tecnológico elegido para configurar el contexto E3.0, su participación que viene gobernada por la demanda térmica, queda limitada por la necesidad de acotar el uso que se haga de la biomasa dada la escasez de este recurso, y dada una demanda térmica, la cantidad de biomasa necesaria para satisfacerla es mucho más elevada al emplear una cogeneración que al emplear una combustión directa.

124 De hecho, en el sector industria, que es donde más uso se hace de la solar térmica distribuida en el contexto E3.0, el aporte solar permite reducir los requerimientos de biomasa dada la escasez de este recurso.

125 En comparación a la cogeneración con combustibles fósiles.

126 Las apariencias engañan, y esta no es una excepción. A pesar de que el colector solar térmico obedece a principios físicos bastante sencillos, producir colectores solares térmicos con buenas prestaciones mantenidas a lo largo del tiempo no es tan sencillo, y más de un caso de desacreditación de la tecnología nos hemos encontrado por este camino. Adicionalmente, a pesar de la "sencillez" del colector solar, desde el punto de vista del conjunto de sistema, una instalación solar térmica es considerablemente más

solar térmica para cubrir la demanda de ACS en un hotel emplazado en A Coruña¹³¹, en función del área de colectores implementada.

El primer elemento de las prestaciones de este sistema sobre el que queremos llamar la atención es la fracción solar (SF), es decir, la cobertura de la demanda total de ACS que se alcanza mediante el aporte solar. Como podemos observar en esta figura, la SF permanece siempre por debajo del 100%, es decir, el aporte solar requiere un apoyo energético para completar la demanda¹³², que en el caso del ejemplo mostrado en esta figura es una caldera de gas natural. Conceptualmente la forma de operar de este sistema energético es dando siempre prioridad¹³³ al aporte solar (es el primero que entra para cubrir la demanda), y completando las necesidades energéticas con el aporte de energía auxiliar (gas natural en este caso). Evidentemente la gestión de la demanda puede contribuir a aumentar la SF para un tamaño dado del campo solar, sin embargo, el carácter distribuido y aislado de esta tecnología hace que el alcance de la GDE sea muy inferior al que podemos obtener a nivel del sistema energético peninsular. La SF puede aumentarse a costa de aumentar el tamaño del campo solar instalado, tendiendo asintóticamente al 100% incluso para una demanda no gestionable, pero a costa de disparar¹³⁴ el coste de la energía de origen solar.

En efecto, esta figura nos muestra también la evolución del coste normalizado (LEC) de la energía útil de esta instalación. El LEC_{solar} muestra el coste de la energía útil de origen solar, el $LEC_{fósil}$ el de la energía de origen fósil, y el LEC_{total} el del conjunto de la instalación híbrida. Como podemos ver, para pequeñas superficies de colectores instalados, el coste de la energía solar es tan solo unos 3 c€/kWh superior a la de la caldera de gas

natural, sin embargo, en estas condiciones la SF proporcionada por la instalación es muy baja.

A medida que aumentamos la superficie del campo solar se va incrementando¹³⁵ de forma muy importante el coste de la energía de origen solar, debido a que el campo solar instalado se emplea con menor CF. El coste de la energía útil obtenido con la caldera también se va incrementando, pues el mayor aporte solar permite producir una menor cantidad de energía de origen fósil, pero dado el nivel considerablemente inferior de inversión de la caldera respecto al campo solar, el ritmo de crecimiento del coste de la energía útil de origen fósil es muy inferior al de la solar, de tal forma que ambos costes se van distanciando¹³⁶. Para una fracción solar del 57%, del orden¹³⁷ de la máxima que exige el Código Técnico de la Edificación (CTE) para esta región, el coste normalizado de la energía útil de origen solar ya alcanza los 13,6 c€/kWh, del orden de 7 c€/kWh superior al de la energía fósil, y para una fracción solar del 82% el coste del aporte solar se acerca a los 20 c€/kWh, del orden de 12 c€/kWh por encima del aporte fósil.

Otro punto a observar es que el coste total de la energía térmica producida alcanza su valor mínimo cuando no hay instalación solar, es decir, que con las estructuras de costes actuales el aporte solar representa un incremento en el coste de la energía térmica producida. Evidentemente, a medida que aumenta el coste del recurso fósil, esta situación va mejorando, pero para que aparezca un mínimo interior en la curva de costes totales¹³⁸ sería preciso que el coste del gas natural aumentara mucho y sobre todo, que el coste del sistema solar se redujera mucho.

Para ver el efecto del emplazamiento solar, en la figura 37 reproducimos los costes totales de

complicada que por ejemplo una instalación solar fotovoltaica, y las posibilidades de que el sistema no opere de forma adecuada a lo largo de toda su vida útil son mucho más elevadas que en el caso de otras tecnologías de energías renovables. El carácter eminentemente distribuido de esta tecnología no ayuda a aliviar esta situación.

127 En condiciones nominales, el rendimiento de un colector solar plano es del orden del 70%, frente al 15% de un módulo fotovoltaico, por lo que la potencia instalada por unidad de superficie es más de 4,5 veces superior con los colectores térmicos que para los módulos fotovoltaicos.

128 El Código Técnico de la Edificación (CTE), que entró en vigor el 29/3/2006.

129 Según la zona climática y tamaño de la instalación.

130 A pesar de esta obligación regulatoria y de la escasa diferencia entre el coste de la energía solar térmica y la alternativa de usar por ejemplo una caldera de gas, la realidad es que el despliegue alcanzado por esta tecnología en nuestro país hasta la fecha ha sido muy inferior a sus posibilidades, y se ha quedado incluso considerablemente por debajo de los objetivos de planificación nacional (PER). Diversos son los factores que han influido en esta situación, pero entre ellos podemos destacar la menor eficiencia de los mecanismos de apoyo implementados para esta tecnología, que bien sea vía subvención o vía obligación regulatoria, no han vinculado el apoyo a sus prestaciones energéticas reales, por lo que ahora se está proponiendo un mecanismo de apoyo tipo prima a la producción como los implementados en las tecnologías renovables de generación eléctrica dentro del régimen especial.

131 A Coruña no es el mejor emplazamiento solar de España, pero tampoco el peor. El valor de la radiación solar anual en horizontal para A Coruña es un 85% de la media de las capitales de provincia, y un 122% de la irradiación solar en la peor capital de provincia. De todas formas, añadiremos comentarios sobre los resultados en un mejor emplazamiento solar.

132 Se trata por tanto de instalaciones híbridas.

133 Este elemento es relevante las limitaciones que surgen en el contexto E3.0 para esta tecnología.

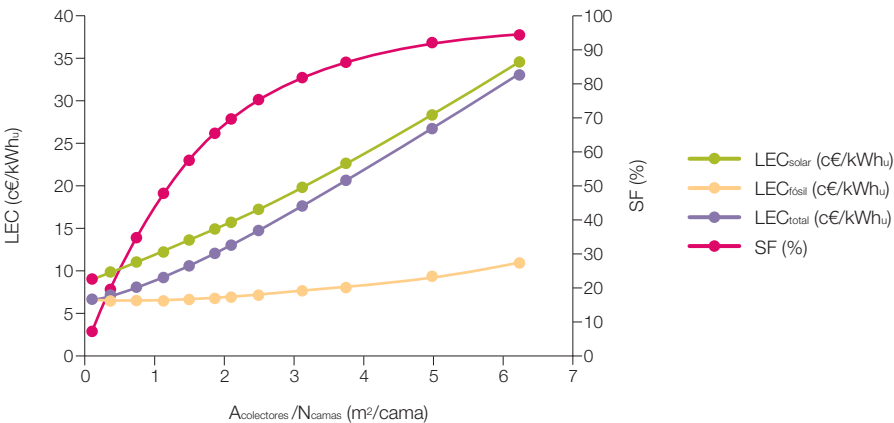
134 Esto es una consecuencia directa de la reducción del factor de capacidad con el que

la energía térmica útil producida para la aplicación considerada en los emplazamientos de A Coruña y Almería como función del tamaño del campo solar. Como podemos observar las diferencias a nivel de coste total entre ambos emplazamientos no son excesivas, debido a que si bien en el mejor emplazamiento solar las fracciones solares se incrementan significativamente, pero el factor de capacidad de la instalación solar aislada se reduce, y a igualdad de campo solar el único ahorro debido al mejor emplazamiento es el de combustible, con una contribución relativamente baja sobre el coste total. Sin embargo, tal y como muestra la figura 38 a igualdad de cobertura solar las diferencias de costes de la energía generada sí que son mucho más importantes, debido a que el mejor emplazamiento permite reducir la inversión en campo solar que es el componente que domina la estructura de costes. Sin embargo, en cualquiera de los casos, al perseguir contribuciones elevadas,

los costes asociados a la generación de la energía útil rápidamente suben por encima de los correspondientes a producir esa energía térmica vía eléctrica mediante bombas de calor eficientes¹³⁹.

De la tecnología solar térmica no podemos esperar una cobertura total de la demanda, sino tan solo una reducción de la parte de la misma a cubrir con otra fuente energética, y debido a que el subsistema solar domina fuertemente en la estructura de costes de estos sistemas, el aporte solar pasa a ser la fuente energética que tiene la máxima prioridad en estos sistemas, lo cual añade un importante grado de inflexibilidad desde el punto de vista de la integración del sistema energético. A pesar de esto, veremos cómo en algunos sectores como el industrial, una vez agotadas las opciones de las bombas de calor trabajando de forma eficiente e integrada la electricidad “residual” procedente de la regulación del

Figura 36. Prestaciones de un sistema solar térmico para ACS en un hotel de A Coruña. Colectores planos ($\eta_{opt} = 81\%$, $U_L = 3.71 \text{ W/m}^2\text{K}$), demanda de ACS de 70 l/cama-día @ 60 °C, coste de inversión del sistema solar de 615 €/m², coste del gas natural de 4.4 €/kWh_{PCS} y rendimiento estacional de la caldera de 91.5%.



se usa la instalación solar a medida que la sobredimensionamos respecto a la demanda que debe de cubrir: una vez más un problema directamente asociado al carácter distribuido y autónomo de estos sistemas, en los que a medida que se incrementa el tamaño relativo de la capacidad instalada respecto a la demanda (múltiplo solar), crece el requerimiento de disipación de energía que no es posible aprovechar localmente. En el caso de los campos solares esta disipación tiene lugar al alcanzar los colectores su temperatura de estancamiento, en la cual su rendimiento se anula. Adicionalmente a la capacidad de generar energía útil (reducción del CF), estas elevadas temperaturas deterioran la instalación solar.

- 135** Con tasas de crecimiento crecientes.
- 136** En el caso de considerar un mejor emplazamiento solar, como Almería (recurso solar del 116% de la media de las capitales de provincia), la SF crece mucho más rápido, por lo que a partir de una superficie del campo solar ligeramente superior a los 2 m²/cama el coste de la energía fósil supera al de la solar y se dispara como consecuencia del pequeño aporte fósil necesario (bajo factor de capacidad de la caldera) debido a la elevada fracción solar obtenida. Sin embargo, el coste total de la energía producida es del mismo orden de magnitud que en A Coruña dado el dominio de la inversión solar.
- 137** El máximo actual exigido en esta zona climática es del 52% para instalaciones con demanda de ACS de más de 20.000 l/d.
- 138** Es decir, para que existiera un tamaño óptimo del campo de colectores para el cual se minimizara el coste total de la energía térmica producida.
- 139** En efecto, en este caso debemos tener presente que el coste de producción de la energía térmica útil sería del orden del coste de producción de la electricidad dividido por el COP de la bomba de calor.

sistema, la energía solar térmica nos permite acotar el uso de biomasa a cantidades compatibles con el recurso disponible.

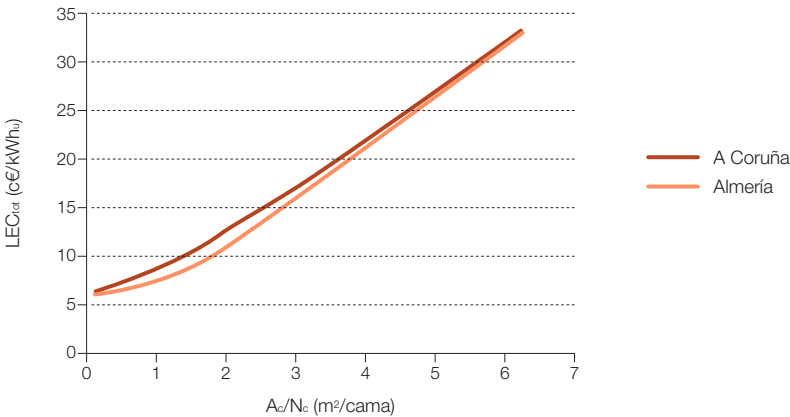
Mención especial merece la integración de energía solar térmica en redes de distrito. Cuando existe una red de distrito de gran capacidad en comparación con la capacidad de la instalación solar que conectamos a la red, gran parte de las rigideces que acompañan a la solar térmica se relajan o desaparecen, así como sus penalizaciones por costes elevados al perseguir una cobertura importante de la demanda. En efecto, la situación pasa a ser análoga a la de interconexión de las instalaciones fotovoltaicas con la red eléctrica en contraposición a las aplicaciones fotovoltaicas aisladas: para una cobertura completa de la demanda en balance anual, el factor de capacidad con el que se usa la instalación interconectada a la red es mucho más elevado, y reduce sus costes por unidad de energía. Sin embargo, en un contexto E3.0 esta opción solo queda abierta para aquellos

emplazamientos que en el pasado desplegaron¹⁴⁰ la red de distribución de energía térmica, pero difícilmente justifica la construcción de esta red de distrito dentro del propio contexto E3.0. En efecto, en un contexto E3.0 donde la demanda térmica del sector edificación se reduce muchísimo hasta prácticamente desaparecer, y en el que la demanda térmica residual se puede cubrir de forma muy eficiente con energía eléctrica, difícilmente se justifica la duplicación¹⁴¹ de infraestructuras asociadas a la creación de una red de distrito, que además cuenta con unas pérdidas por distribución mucho más elevadas a las correspondientes a la distribución de energía eléctrica. Por estos motivos, el despliegue de redes de distrito no parece la opción más adecuada para construir el sistema energético bajo un contexto de eficiencia actual. Sin embargo, allí donde esa infraestructura energética adicional ya se encuentre desplegada, la evolución eficiente en el contexto actual pasa por desplazar la generación procedente de cogeneración centralizada, y la integración

140 En países como Dinamarca, en el pasado se hizo una fuerte apuesta por las redes de distrito como estrategia para aprovechar el calor residual de sus centrales térmicas. Esta estrategia, desde el punto de vista de la eficiencia energética, resultaba muy apropiada en el sistema energético del pasado, gobernado desde el lado de la oferta, y basado en la generación de electricidad mediante combustibles fósiles en grandes centrales termoeléctricas. Sin embargo, para los sistemas energéticos en un contexto E3.0, o incluso en un contexto BAU con una creciente participación de renovables en el sistema de generación eléctrica, esta estrategia no resulta adecuada por las rigideces que introduce, y dificulta la penetración de energías renovables en el sistema, duplicando las infraestructuras energéticas, e incurriendo en un incremento de pérdidas por distribución. De hecho, resulta curioso analizar el desempeño del sistema energético en países como Dinamarca que en el pasado realizaron una gran apuesta en esta dirección: nos encontramos con un sistema eléctrico altamente carbonizado y rígido para la incorporación de energías renovables (a pesar de las buenas conexiones internacionales), y un sistema térmico disfrazado de unas muy buenas prestaciones ambientales mediante la no internalización de su responsabilidad en la operación de las centrales fósiles. Es la óptica del pasado, en la que el calor producido por las centrales térmicas se consideraba un residuo y por tanto su carbonización no se repercutía en la generación térmica. Pero en la óptica actual, ese calor ya no es un residuo en tanto en cuanto que existen otras alternativas para generar la electricidad sin depender del la combustión de recursos fósiles, y por tanto el calor debe compartir la responsabilidad en cuanto a emisiones de carbono con la electricidad generada a partir de la combustión de esos recursos fósiles, y en estas condiciones, las prestaciones ambientales del sistema de generación térmica ya distan mucho de la idealidad que aparentaban.

141 Duplicación porque la red eléctrica con capacidad de distribuir los mismos servicios térmicos ya tiene que ser desplegada para cubrir el grueso de la demanda energética distribuida, que es en forma de energía eléctrica. Por tanto, lo más coherente

Figura 37. Comparativa de los costes totales de la energía útil generada de una instalación solar con apoyo de gas natural para la cobertura de la demanda de ACS en un hotel, como función del tamaño del campo solar.

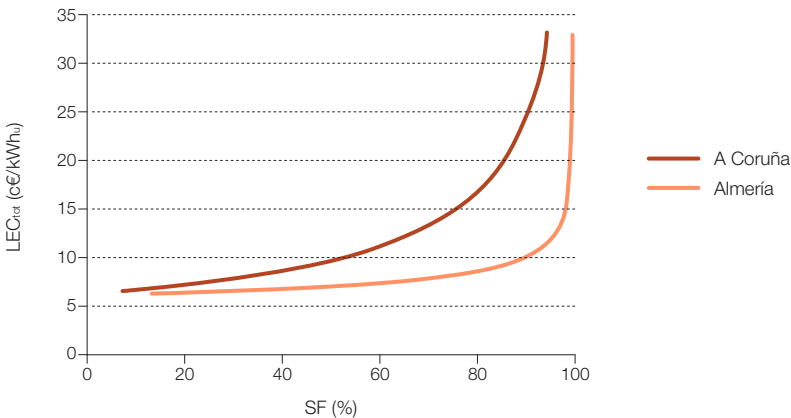


de solar térmica distribuida interconectada a esta red puede proporcionar una herramienta muy adecuada y eficiente para avanzar en esa dirección.

Una opción para obtener un sistema 100% renovable basado en la utilización de energía solar térmica distribuida consiste en hibridar el campo solar con una caldera de biomasa. Esta combinación, tanto para el caso de dedicar el aporte solar a la cobertura de la demanda de ACS, como cuando el aporte solar se extiende para cubrir además de la demanda de ACS la de calefacción (combisystem) fue analizada en (García-Casals X., 2005) para el caso de una vivienda unifamiliar en la Comunidad de Madrid¹⁴², que nos puede servir de ejemplo para comentar los principales aspectos conceptuales asociados a esta opción tecnológica. En la figura 39 presentamos las prestaciones energéticas de este sistema, tanto para el caso de dedicar el aporte solar tan solo al ACS como para el caso de dedicarlo al ACS y a la calefacción.

En el caso de emplear la instalación solar tan solo para la cobertura de la demanda de ACS, podemos observar cómo la fracción solar en la cobertura de la demanda de ACS crece rápidamente al aumentar el tamaño del campo solar. Para un área de 2 m² ya alcanzamos la fracción solar del 60% que exige el CTE para esta instalación¹⁴³. Para estas bajas superficies del campo solar, la instalación solar se emplea de forma muy efectiva (CF muy elevado), por lo que los costes de la energía solar producida son bajos. Si seguimos aumentando el tamaño del campo solar, crece la fracción solar, de tal forma que para 10 m² de colector prácticamente cubrimos ya el 90% de la demanda de ACS con el aporte solar, pero a costa de una gran reducción del CF que tendrá consecuencias muy importantes sobre el coste de la energía térmica útil de origen solar. Y a pesar de ello, la fracción solar total (SF_{tot}), esto es, la asociada a la cobertura de la demanda térmica total (ACS y calefacción), sería tan solo del 13% para superficies del campo solar por

Figura 38. Comparativa de los costes totales de la energía útil generada de una instalación solar con apoyo de gas natural para la cobertura de la demanda de ACS en un hotel, como función de la fracción solar alcanzada.



parece emplear esa misma estructura de distribución para cubrir el pequeño remanente de demanda térmica que escapa al alcance de las medidas de eficiencia.

142 Recurso solar en términos de irradiación total anual sobre horizontal del orden de la media de las capitales de provincia peninsulares.

143 Nótese que, al tratarse de una instalación híbrida solar térmica –biomasa–, la fracción renovable sería del 100% independientemente del tamaño del campo solar, por lo que desde el punto de vista del CTE no habría obligación alguna de instalar colectores solares. En el caso de que el apoyo del campo solar fuera energía fósil, el CTE requeriría una fracción solar mínima del 60%.

encima de 10 m². En estas condiciones estamos desperdiciando la mayoría de la capacidad de generación de la instalación solar, por lo que resulta interesante permitir que aporte también a la cobertura de demanda térmica para calefacción.

En la misma figura podemos observar las prestaciones energéticas del combisystem. En estas condiciones, la fracción solar no se estanca a partir de 10 m² de superficie de colectores, y puede llegar a alcanzar valores considerablemente más elevados. El CF para un determinado valor de la superficie de colectores también es en este caso considerablemente superior, e indica un mejor aprovechamiento de la instalación solar. Sin embargo, para 10 m² la fracción solar para la cobertura de la demanda térmica total es del orden del 25%, y es preciso llegar a superficies del orden de 30 m² para que el aporte solar cubra la mitad de la demanda térmica: es decir, para la mayoría de los casos con

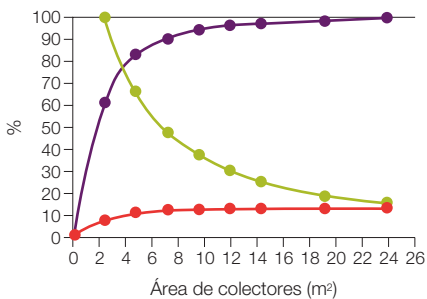
sentido técnico-económico, la principal fuente energética para la cobertura de la demanda es la biomasa.

Por lo que respecta a la estructura de los costes del sistema híbrido solar-biomasa, en la figura 40 presentamos la dependencia con la superficie del campo solar de los costes normalizados del aporte solar, el aporte de biomasa y el total del sistema.

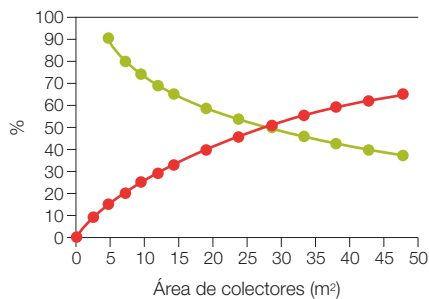
Como podemos observar, el coste de la energía útil de origen solar presenta en este caso un valor mínimo, para el caso de que el aporte solar se destine tan solo a la producción de ACS se sitúa en torno a los 6 m², y en el caso del combisystem el mínimo es más acentuado y se encuentra entorno a los 10 m². Para el caso de usar el aporte solar tan solo para ACS, el coste del aporte térmico útil procedente de la biomasa se mantiene prácticamente constante independientemente de la superficie de colectores solares, debido a que en este caso

Figura 39. Fracción solar y factor de capacidad de una instalación solar térmica hibridada con biomasa destinada a cubrir la demanda de ACS y calefacción o solo la de ACS en una vivienda en la Comunidad de Madrid. Demanda ACS de 150 l/día @ 60 °C y de calefacción de 65 kWh/m²-a para 300 m², colectores planos ($\eta_{opt} = 81.8\%$; $k_1 = 3.47$ W/m²K; $k_2 = 0.0101$ W/m²K² (García-Casals X., enero 2005).

Solar para ACS



Solar para ACS & calefacción

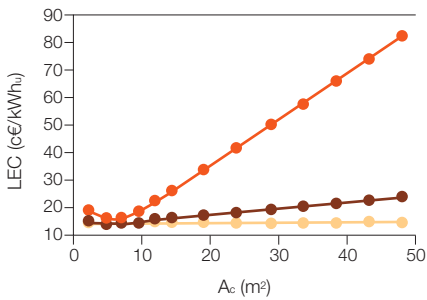


—●— CF —●— SF_{ACS} —●— SF_{tot}

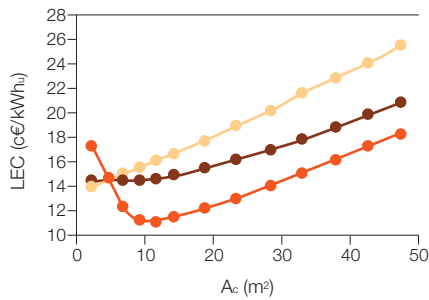
Figura 40. Coste normalizado de la energía producida con una instalación solar térmica hibridada con biomasa destinada a cubrir la demanda de ACS y calefacción o solo la de ACS en una vivienda en la Comunidad de Madrid. Demanda ACS de 150 l/día @ 60 °C y de calefacción de 65 kWh/m²-a para 300 m², colectores planos ($\eta_{opt} = 81.8\%$; $k_1 = 3.47$ W/m²K ; $k_2 = 0.0101$ W/m²K², precio de la biomasa de 2.91 c€/kWh para las astillas de madera y de 2.62 c€/kWh para los pellets, caldera de biomasa con 89.5% de rendimiento estacional, coste de inversión de 470 €/kW @ 25 kW, y coste de inversión del sistema solar decreciente con el tamaño del campo tendiendo asintóticamente a 420 €/m² para el caso de instalaciones solares para ACS y de 450 €/m² para instalaciones solares de ACS y calefacción (García-Casals X., enero 2005).

Astillas madera. Tamaño silo variable. Caldera kWb V

Solar para ACS

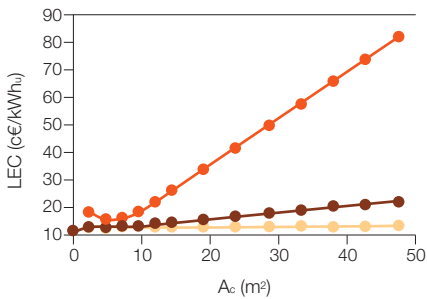


Solar para calefacción + ACS

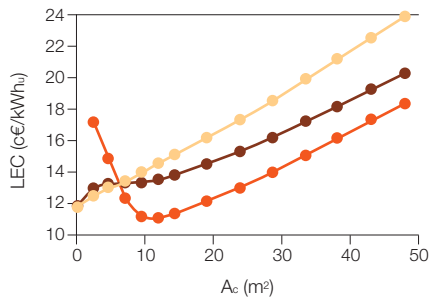


Pellets. Tamaño silo variable. Caldera kWb V

Solar para ACS



Solar para calefacción + ACS



—●— Biomasa —●— Total —●— Solar

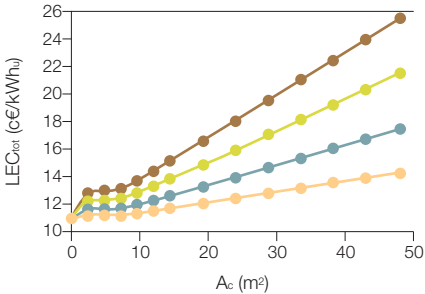
es la biomasa la que se hace cargo del grueso de la demanda térmica. Pero para el caso de que el aporte solar se emplee para el ACS y la calefacción, el coste de la energía útil de origen de la biomasa crece rápidamente con la

superficie de colectores. A diferencia del caso anterior del hotel en A Coruña en el que la hibridación se realizaba con una tecnología de muy bajo coste de inversión (caldera de gas natural), en el caso del híbrido solar-biomasa, el

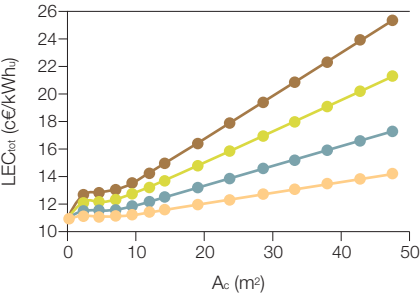
Figura 41. Efecto del coste de inversión asintótico del sistema solar sobre el coste normalizado de la energía producida con una instalación solar térmica hibridada con biomasa en la que la instalación solar se emplea tan solo para el ACS, para una vivienda en la Comunidad de Madrid. Demanda ACS de 150 l/día @ 60 °C y de calefacción de 65 kWh/m²-a para 300 m², colectores planos ($\eta_{opt} = 81.8\%$; $k_1 = 3.47 \text{ W/m}^2\text{K}$; $k_2 = 0.0101 \text{ W/m}^2\text{K}^2$, precio de la biomasa de 2,91 c€/kWh para las astillas de madera, 2,62 c€/kWh para los pellets, y 2,24 c€/kWh para el hueso de aceituna, caldera de biomasa con 89.5% de rendimiento estacional, coste de inversión de la caldera de biomasa de 470 €/kW @ 25 kW (García-Casals, X., enero 2005).

Efecto inversión solar. Energía solar para ACS. Caldera KWB V

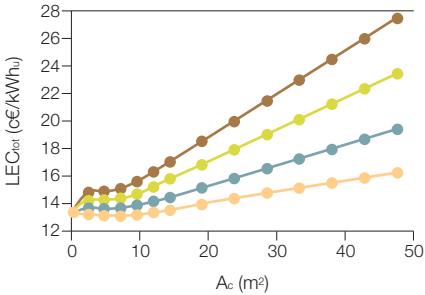
Hueso aceituna. Tamaño silo fijo



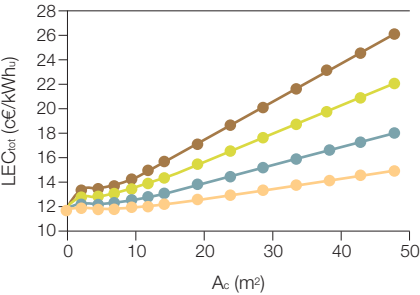
Hueso aceituna. Tamaño silo variable



Astillas madera. Tamaño silo variable



Pellets. Tamaño silo variable



—●— $C''_{inv} = 600 \text{ €/m}^2$ —●— $C''_{inv} = 400 \text{ €/m}^2$ —●— $C''_{inv} = 200 \text{ €/m}^2$ —●— $C''_{inv} = 50 \text{ €/m}^2$

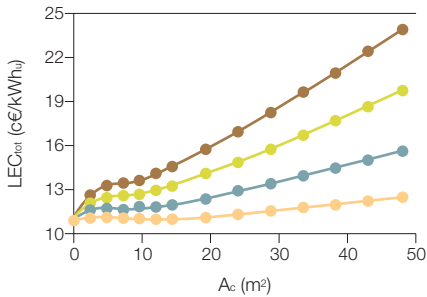
coste de inversión de la caldera es muy superior (unas siete veces superior), por lo que la reducción del CF de la caldera a medida que aumentamos el aporte solar repercute muy significativamente sobre el coste de la energía útil de origen de la biomasa. Estas dos tendencias contrapuestas de los costes de la energía térmica de origen solar y de origen de la biomasa

son las que producen la tendencia a que aparezca un mínimo local en la curva de coste total de la energía térmica producida por el sistema híbrido. Este mínimo local tiende a acentuarse a medida que se reduce el coste de inversión de la instalación solar, o a medida que aumenta el coste del combustible de biomasa. Para la estructura de costes actual, el mínimo local está

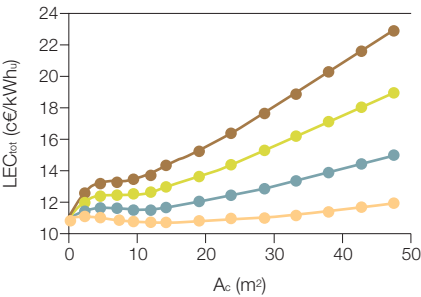
Figura 42. Efecto del coste de inversión asintótico del sistema solar sobre el coste normalizado de la energía producida con una instalación solar térmica hibridada con biomasa en la que la instalación solar se emplea para el ACS y la calefacción (combisystem) para una vivienda en la Comunidad de Madrid. Demanda ACS de 150 l/día @ 60 °C y de calefacción de 65 kWh/m²-a para 300 m², colectores planos ($\eta_{opt} = 81.8\%$; $k_1 = 3.47 \text{ W/m}^2\text{K}$; $k_2 = 0.0101 \text{ W/m}^2\text{K}^2$), precio de la biomasa de 2,91 c€/kWh para las astillas de madera y de 2.62 c€/kWh para los pellets, caldera de biomasa con 89,5% de rendimiento estacional, coste de inversión de la caldera de biomasa de 470 €/kW @ 25 kW (García-Casals X., enero 2005).

Efecto inversión solar. Energía solar para calefacción + ACS. Caldera KWB V

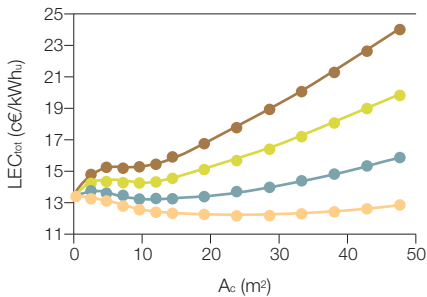
Hueso aceituna. Tamaño silo fijo



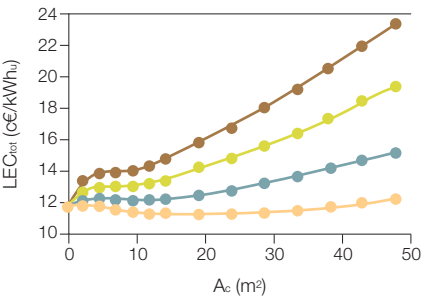
Hueso aceituna. Tamaño silo variable



Astillas madera. Tamaño silo variable



Pellets. Tamaño silo variable



—●— $C''_{inv} = 600 \text{ €/m}^2$ —●— $C''_{inv} = 400 \text{ €/m}^2$ —●— $C''_{inv} = 200 \text{ €/m}^2$ —●— $C''_{inv} = 50 \text{ €/m}^2$

asociado a un coste superior al correspondiente a emplear tan solo la biomasa para cubrir el total de la demanda térmica, por lo que desde un punto de vista económico el óptimo sería el asociado a suprimir la instalación solar. Sin embargo, habida cuenta de que el valor del coste para este mínimo total es para los combisystem

bastante parecido al coste sin instalación solar, y dado lo escaso del recurso biomasa en nuestro país, el sistema híbrido solar-biomasa puede resultar más apropiado desde una perspectiva de sostenibilidad, si bien, tal y como hemos visto anteriormente, para estos 10 m² de colector la fracción solar es tan solo de un 25%.

En este contexto cabe plantearse hasta dónde tendría que reducirse el coste de inversión en el sistema solar para que el sistema óptimo, desde el punto de vista económico, implicara la instalación de un campo solar con una fracción solar lo más elevada posible. Las figuras 41 y 42 nos presentan estos resultados para los casos de emplear el aporte solar solo para la cobertura del ACS o de usarlo tanto para el ACS como para la calefacción.

En el caso de emplear el aporte solar tan solo para el ACS, vemos cómo es preciso reducir el coste asintótico¹⁴⁴ de inversión de la instalación solar hasta 50 €/m², es decir, del orden de ocho veces inferior al coste actual para que se produzca esta situación, e incluso en este caso, debido a la limitación en disponibilidad de demanda a cubrir (solo ACS), la superficie de colectores a instalar es del orden de tan solo 6 m², que si bien proporciona una cobertura de la demanda de ACS del orden del 90%, en términos de la demanda térmica total la cobertura solar es tan solo del orden del 12%.

Para el caso del combisystem, según el combustible de biomasa empleado, vemos cómo entre 200 €/m² y 50 €/m² de inversión asintótica del sistema solar puede hacer aparecer este óptimo solar, que en algunos casos, para 50 €/m² se puede encontrar en torno a los 25-30 m² de superficie de campo solar, lo cual nos permitiría cubrir del orden del 50% de la demanda térmica total con energía solar. Sin embargo, una reducción de costes de inversión solar térmica hasta los 50 €/m² parece bastante difícil que se pueda alcanzar.

Los sistemas híbridos solar-biomasa constituyen por tanto una alternativa descentralizada para la cobertura de la demanda térmica en el sector edificación con energías renovables. Pero como hemos visto en el análisis anterior,

el óptimo económico se inclina hacia la sustitución del aporte solar por biomasa, y en el mejor de los casos, con una gran reducción en los costes de la inversión solar, podríamos llegar a un óptimo económico en que la energía solar se hiciera cargo del orden del 25% de la demanda, quedando el resto para la biomasa. Es decir, con o sin aporte solar la principal fuente energética usada en estos sistemas es la biomasa. Sin embargo, tal y como detallaremos más adelante, el recurso de biomasa en nuestro país resulta muy escaso en relación a la demanda potencial, y habiendo aplicaciones energéticas en las que el uso de la biomasa es prácticamente la única alternativa de origen renovable y coste limitado, no parece adecuado invertir este recurso para aplicaciones energéticas como es la cobertura de la demanda térmica en el sector edificación que admiten otras opciones de cobertura con energía renovable.

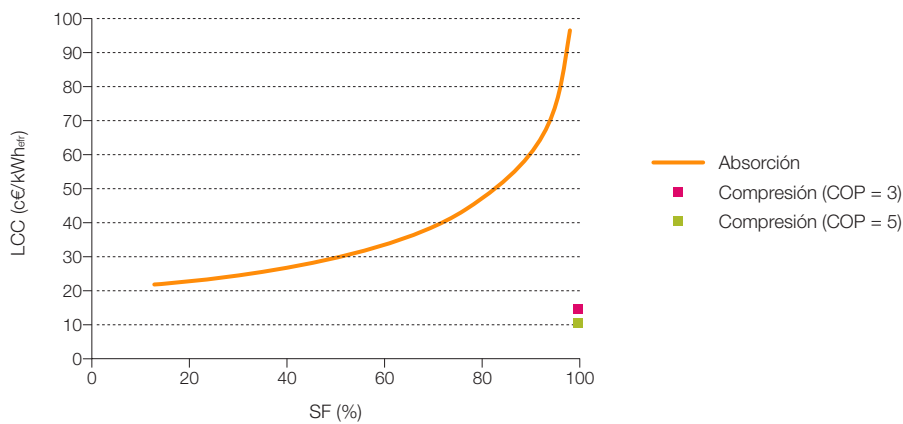
Otra opción que resulta interesante analizar para el caso de la solar térmica es su aplicación en refrigeración solar. En (García-Casals X., 2006-2) se analizan los aspectos económicos de la refrigeración solar distribuida autónoma (empleando energía solar térmica de baja temperatura), de forma comparativa con la otra alternativa solar, que denominaremos centralizada, y que en general consiste en la generación centralizada de electricidad con energías renovables y el uso de bombas de calor para refrigerar los edificios empleando esta electricidad de origen renovable.

En la figura 43 mostramos la comparación del coste normalizado de la energía de refrigeración obtenida para un caso optimista para la solar térmica distribuida. En efecto, consideramos que la electricidad renovable procede de centrales termosolares con un LEC de 25 c€/kWh, valor considerablemente superior al potencial que ofrece esta tecnología (GP,

¹⁴⁴ El que se alcanza para una superficie de 20 m².

Figura 43. Comparativa de los costes de refrigeración solar mediante un enfoque centralizado (electricidad de una central termosolar con LEC = 25 c€/kWh y un 15% de sobrecoste adicional para el usuario, empleando enfriadoras de compresión con COP = 3 y COP = 5), y el enfoque descentralizado basado en solar térmica distribuida (a un coste de 600 €/m² para el sistema solar) y una enfriadora de absorción de simple efecto con coste de 700 €/kW, y gas natural a 4.8 c€/kWhPCS con una caldera del 90% de rendimiento estacional como fuente auxiliar (García-Casals X., 2006-2).

LEC_{termosolar} = 25 c€/kWh; inversión máquina absorción = 700 €/kW; inversión sistema solar = 600 €/m²



2007) y al que ya ofrecen en la actualidad otras tecnologías renovables como la eólica. Además, suponemos que el coste para el usuario final de esta electricidad es el valor de este LEC incrementado en un 15%, es decir, que la electricidad le cuesta al usuario prácticamente 29 c€/kWh. Para las máquinas de refrigeración de compresión hemos considerado valores del COP representativos de los valores que actualmente podemos encontrar en el mercado para máquinas aire-aire de pequeño tamaño (COP = 3), y para máquinas con mejores prestaciones que cabe esperar que estén disponibles en el futuro próximo¹⁴⁵ dentro del mismo segmento de mercado, o que se encuentran ya disponibles en el caso de recurrir a máquinas refrigeradas por agua (COP = 5). La inversión del sistema solar térmico de baja temperatura la consideramos de 600 €/m², y

el coste de inversión de la máquina de absorción de simple efecto lo consideramos¹⁴⁶ de 700 €/kW.

En estas condiciones, la figura 43 compara el coste normalizado de la refrigeración (LCC) en función de la fracción solar alcanzada por el sistema solar térmico distribuido. Como podemos observar, en todo el rango de valores el coste del sistema solar autónomo es considerablemente superior al del sistema solar centralizado, y especialmente si le exigimos al sistema solar autónomo que proporcione fracciones solares del orden de la que alcanzamos al emplear electricidad de origen renovable de la red eléctrica (SF = 100%), en cuyo caso el coste del sistema autónomo es más de 10 veces superior al del centralizado. En estas condiciones parece

¹⁴⁵ Como ya hemos comentado anteriormente, en el caso de las pequeñas enfriadoras domésticas, ya existen estándares con COP del orden de 6, y para el caso de recurrir a enfriadoras agua-agua, ya disponemos en el mercado de enfriadoras con COP del orden de 8.

¹⁴⁶ Es importante apreciar que por las fechas de publicación de (García-Casals X., 2006-2) las ofertas comerciales de enfriadoras de absorción de pequeño tamaño estaban en el orden de 2.000-3.000 €/kW.

difícil de justificar la aproximación autónoma de la refrigeración solar frente a la opción centralizada, que por otro lado conlleva una instalación y operación mucho más sencilla.

Por tanto, podemos concluir que en un contexto E3.0 en el que en la red eléctrica disponemos de 100% de generación de origen renovable, y en el que además, debido a los requerimientos de regulación del sistema eléctrico, contamos con electricidad residual de origen renovable, a diferencia de lo que sucede en un contexto como el actual o el BAU, la solar térmica de baja temperatura no aparece como la opción tecnológica más adecuada para cubrir con renovables la demanda de energía térmica. Es más, la solar térmica de baja temperatura, al constituir el aporte energético prioritario una vez implementada en un sistema, introduce una importante rigidez en el sistema energético que acota el alcance potencial de la GDE para regular dicho sistema. Desde esta perspectiva, tampoco parece la opción tecnológica más apropiada.

En el sector edificación donde la demanda térmica es de baja temperatura, dentro del contexto E3.0, parece por tanto que el primer recurso energético a incorporar para la cobertura de la demanda térmica es la electricidad “residual” procedente de la necesidad de regulación del sistema eléctrico. El aprovechamiento eficiente de esta electricidad residual conlleva la aplicación de bombas de calor, y puesto que este equipo ya se encuentra por tanto incorporado al edificio, la solar térmica debe buscar sinergias positivas con las bombas de calor para poder justificar su aportación. La justificación económica de la solar térmica de baja temperatura para cubrir a la demanda térmica del sector edificación quedaría por tanto condicionada por los siguientes elementos:

- La reducción en su CF por la incorporación prioritaria de la electricidad residual, lo cual conduce a un incremento del coste de la energía de origen solar.
- El coste de la generación térmica vía bombas de calor eficientes con electricidad no residual.
- La reducción de la demanda de ACS a cubrir con solar térmica como consecuencia de la recuperación energética¹⁴⁷ en las bombas de calor en modo refrigeración.

Basándonos en los resultados que hemos mostrado, parece que sería precisa una gran reducción del coste de inversión de la solar térmica¹⁴⁸ para que su incorporación como parte de la solución tecnológica en el sector edificación quedara justificada desde el punto de vista económico. Sin embargo, hay dos argumentos que pueden conducir a modificar esta conclusión desde el punto de vista de la consideración de la participación de la solar térmica para la cobertura de la demanda del sector edificación en el contexto E3.0:

- El hecho de que durante el proceso de transición desde el contexto BAU al contexto E3.0 la solar térmica de baja temperatura constituye, sin duda, una tecnología apropiada desde la perspectiva de la sostenibilidad, que además se encuentra incorporada en la regulación energética actual (CTE) como una exigencia de obligado cumplimiento en la construcción de nuevos edificios. Por tanto, cabe esperar que al llegar a completar la transición hacia el contexto E3.0 exista ya un importante parque de colectores solares térmicos integrado en los edificios.
- Las opciones que la solar térmica puede ofrecer para mejorar el comportamiento de las bombas de calor, de tal forma que

¹⁴⁷ En efecto, en modo de operación de refrigeración, la bomba de calor disipa calor residual al entorno, y parte de este calor residual es susceptible de ser aprovechado para la producción de ACS. Para no empeorar el rendimiento de la bomba de calor aumentando la temperatura del foco caliente, en modo refrigeración hasta alcanzar los valores requeridos por la generación de ACS, actualmente las bombas de calor domésticas que incorporan esta capacidad emplean la energía disponible asociada al sobrecalentamiento del gas a la salida del compresor.

¹⁴⁸ Así como una simplificación de la instalación y operación de estas instalaciones, y una modificación de los planteamientos asociados a la incorporación de esta tecnología para que se garantizaran sus prestaciones durante la vida útil de la instalación.

la asociación solar térmica-bomba de calor pase a constituir una combinación sinérgica en lugar de una competencia directa. Y en efecto, existen distintas opciones para alcanzar estas sinergias entre ambas tecnologías:

- Sistemas de bomba de calor geotérmica de alta eficiencia y sinergias con solar térmica:

Las bombas de calor geotérmicas (GSHP¹⁴⁹), además de la mejora de la eficiencia energética del suministro de calor y frío¹⁵⁰, proporcionan la ventaja frente a otras bombas de calor de evitar la mala estética¹⁵¹ de los aerocondensadores¹⁵². Sin embargo la sostenibilidad de esta tecnología pasa por cuadrar los balances anuales de energía extraída e introducida en el terreno. De no hacerlo así, al ir pasando los años va empeorando el rendimiento del sistema hasta llegar a un punto en el que no resulte ventajoso desde un punto de vista energético frente a otras opciones, motivo por el cual su mayor coste de inversión¹⁵³ dejaría de estar justificado.

Por otro lado, la energía solar térmica, tal y como hemos comentado anteriormente, puede encontrarse con serias limitaciones para su desarrollo en el escenario probable al que nos dirigimos de elevada penetración de renovables en el sistema de generación eléctrica. En efecto, en estas condiciones la solar térmica competiría con electricidad “residual” del sistema de generación que podría usarse de forma muy eficiente mediante bombas de calor para cubrir las necesidades de energía térmica, en unas condiciones donde lo prioritario ya no sería el usar el aporte solar térmico, sino el valorizar la energía eléctrica residual, lo cual obligaría a aumentar la ca-

pacidad de almacenamiento del aporte solar local. En estas condiciones parece muy adecuado impulsar sinergias de la solar térmica de baja temperatura con las bombas de calor geotérmicas: la solar térmica puede emplearse en este contexto tanto para cuadrar el balance energético anual del terreno en emplazamientos con dominio de la demanda de calefacción¹⁵⁴ (valorizando el aporte solar excedente de verano), como para aumentar el rendimiento de la bomba de calor geotérmica¹⁵⁵, todo ello mediante la acumulación del aporte solar en el mismo terreno en el que están instalados los pozos geotérmicos, lo cual añade un componente de almacenamiento térmico estacional (UTES¹⁵⁶) que también favorece mucho la integración de la solar térmica en un contexto donde lo prioritario será valorizar la electricidad residual del sistema de generación eléctrica.

Por tanto, la tecnología GSHP de elevada eficiencia¹⁵⁷, con almacenamiento en terreno (UTES), e hibridación con otras tecnologías (solar, torre refrigeración) para equilibrar balance anual de calor y frío en terreno se presenta como una muy buena opción de futuro para la eficiencia energética tanto de los edificios¹⁵⁸ como del sistema de generación eléctrica.

De hecho, este puede ser un gran nicho para solar térmica¹⁵⁹, al valorizar toda su producción de verano de forma desacoplada de la demanda¹⁶⁰ para cargar el almacén del suelo con energía térmica de cara al invierno. Importante en climas con dominancia de la temporada de calefacción.

- Sistemas de bomba de calor aerotérmica eficientes y sinergias con solar térmica:

149 GSHP: ground source heat pumps.

150 Asociada fundamentalmente a la mejora del nivel térmico de su foco frío (aplicación en calefacción) o caliente (aplicación en refrigeración), al sustituir el aire ambiente por la temperatura del subsuelo, más regular y menos extrema que la del aire exterior gracias a la gestión inercial que el terreno hace del aporte solar en la superficie. Esto proporciona el potencial de mejorar tanto el COP en condiciones de diseño como los valores estacionales del COP. Sin embargo, también es cierto que en la actualidad existen bombas de calor aerotérmicas con mejores prestaciones que las geotérmicas, por no haberse incorporado todavía en estas últimas todos los avances a nivel de componentes.

151 Sin embargo, debemos tener presente que ante un despliegue a gran escala de la incorporación de las bombas de calor en el sector edificación de una forma planificada, la estética de los intercambiadores ambiente de estos equipos debería evolucionar y alejarse radicalmente de la nefasta estética que tiene la actual incorporación caótica de estos equipos para la cobertura de una demanda de refrigeración que no fue tenida en cuenta al diseñar el edificio. En efecto, la imagen que actualmente podemos apreciar en nuestras ciudades de edificios salpicados con intercambiadores ambiente para cubrir de forma desordenada la demanda de refrigeración es una consecuencia directa de la falta de planificación, y no debemos achacarla directamente a la tecnología de bombas de calor. En una aproximación más racional, incluso con la tecnología actual, los intercambiadores ambiente de estas bombas de calor se encuentran ubicados en cubierta, y anulan por tanto su impacto estético. Adicionalmente, queda pendiente un trabajo de desarrollo de estas tecnologías para buscar formas adicionales de integrar estos elementos en la envolvente del edificio con bajo impacto visual.

152 Sin embargo actualmente requieren un 30-50% más de inversión.

153 Asociado en gran parte a la implementación del intercambiador con el terreno.

154 Lo cual cubre la gran mayoría de las zonas climáticas peninsulares.

155 El aporte solar incrementa el

La tecnología GSHP no siempre es aplicable. Cuando esto sucede, las bombas de calor aerotérmicas (ASHP¹⁶¹) de elevada eficiencia constituyen una de las mejores soluciones desde el punto de vista energético¹⁶².

Y también en el campo de las bombas de calor aerotérmicas cabe la opción de explorar sinergias del acoplamiento con sistemas solares térmicos, para buscar esquemas de operación ganadores que no quiten nicho de mercado a la solar térmica y que beneficien la operación de las bombas de calor¹⁶³. Sin embargo, a diferencia de la opción del acoplamiento con las GSHP, en el caso de las ASHP el beneficioso elemento del almacenamiento estacional es más complejo de incorporar.

Otra opción de desarrollo sinérgico que puede favorecer la incorporación de la solar térmica en el sector edificación dentro de un contexto E3.0 lo constituyen los colectores solares mixtos térmica / fotovoltaica. La idea de juntar en un único componente las funciones de un módulo fotovoltaico y de un colector solar térmico viene de antiguo. Pero, los bajos rendimientos alcanzados en el sistema térmico sin empeorar el comportamiento del sistema fotovoltaico, no han permitido que la aplicación encontrara un nicho de mercado. Sin embargo, es una tecnología que presenta sinergias interesantes: por un lado, la refrigeración del módulo fotovoltaico permite aumentar la generación eléctrica del mismo, especialmente en las temporadas de mayor irradiación solar. Por otro lado, esa “refrigeración” del módulo fotovoltaico proporciona una generación de calor útil susceptible de ser empleada en el edificio en el que se encuentra instalado el módulo fotovoltaico. En un contexto E3.0 en el que la generación fotovoltaica distribuida en los edificios parece llamada a jugar un papel importante en la integración de

renovables en el sistema de generación, es posible que la solar térmica de baja temperatura acabe compitiendo por espacio con la solar fotovoltaica. En estas condiciones, el poder juntar ambas aplicaciones en el mismo sistema cobraría todavía más sentido. De hecho, recientemente está volviendo a cobrar gran atención este concepto. Una de las opciones que parecen más interesantes es precisamente la de emplear esta tecnología acoplada a una GSHP con un UTES, de tal forma que la generación de calor útil que producen los colectores mixtos se pueda emplear para recargar térmicamente el terreno desde el que capta la energía térmica la GSHP en temporada de calefacción. Otra aplicación a explorar sería la integración arquitectónica (BIPV) en fachadas ventiladas con una recuperación energética en el flujo de aire. También existe la posibilidad de aplicar esta tecnología junto a las estrategias de iluminación natural de espacios, al colocar los colectores en una fachada ventilada con vidrio interior altamente opaco a fracción no visible: el aire calentado se puede usar en verano¹⁶⁴ para ventilación natural y en invierno para calefacción.

Como consecuencia de todo lo anteriormente comentado, y a pesar de que dentro de un contexto E3.0 podría resultar difícil justificar desde un punto de vista económico la participación de la solar térmica para la cobertura de la demanda térmica del sector edificación, consideramos que hay bastantes argumentos para incorporarla dentro del mix tecnológico del contexto E3.0. Por tanto, vamos a considerar en el escenario del contexto E3.0 que la solar térmica se encuentra incorporada en el sector edificación para la cobertura de la fracción de la demanda de ACS que marca la HE4 del CTE en la actualidad.

El otro sector en el que la solar térmica distribuida puede participar es el sector industria,

nivel térmico del foco frío en modo calefacción, por lo que aumenta el rendimiento térmico de la bomba de calor en condiciones de calefacción. Este aspecto, al aplicarlo más allá del balance anual de energía en el terreno para conseguir mantener las condiciones térmicas del terreno, debe buscar un equilibrio entre la mejora del rendimiento en modo calefacción y el empeoramiento en modo refrigeración.

156 UTES: Underground Thermal Energy Storage.

157 En un UTES la HP no siempre tiene que funcionar: a bajas cargas opera solo el intercambiador con el terreno sin necesidad de arrancar el compresor de la bomba de calor.

158 Según ETP2008 de AIE, el objetivo de regiones frías debe ser *passive house* para 2015. En la actualidad, este objetivo puede quedarse incluso corto frente al potencial de eficiencia que se está intentando impulsar en los edificios para esas fechas, acercándose a los edificios de consumo prácticamente nulo (la Directiva 2010/31/EU pretende que los edificios nuevos sean de consumo prácticamente nulo para el año 2010, aunque desafortunadamente se les olvidó definir con precisión qué quiere decir eso del consumo prácticamente nulo). El desarrollo de esta tecnología, junto con integración fotovoltaica, podría ayudar mucho a alcanzar estos objetivos de edificios de consumo energético nulo.

159 Como ejemplo, podemos citar la gran expansión reciente en China de la aplicación de esta tecnología desde el año 2007.

160 Y por tanto sin introducir rigidez sobre el sistema energético para la regulación de la producción eléctrica mediante DSR.

161 ASHP: Air Source Heat Pumps.

162 Sin embargo, la mayoría de bombas de calor que siguen instalándose en nuestro país tienen unos rendimientos considerablemente inferiores a los que se podrían alcanzar. A modo de referencia, el estándar japonés para 2010 de los equipos de aire acondicionado de pequeña potencia es alcanzar rendimientos de COP = 6.32, mientras que muchos de los equipos que se siguen comercializando en España tienen COP ≈ 3 (de hecho para COP > 3 ya se alcanza la clase-A de la calificación energética). El COP puede incluso progresar más allá de estos valores si se procede a centralizar la producción de frío y calor a nivel edificio o barrio.

dentro del cual encontramos tanto demanda de energía térmica de baja temperatura, como de media y alta temperatura.

Por lo que respecta a la demanda térmica de baja temperatura, podríamos hacer consideraciones parecidas a las anteriormente expuestas para el sector edificación¹⁶⁵: Las bombas de calor constituyen la opción tecnológica más eficiente para el aprovechamiento en primera instancia de la electricidad “residual” asociada a la regulación del sistema eléctrico, contribuyendo por tanto a la regulación del sistema energético integrado, y una vez incurrido este coste de inversión, la opción más favorable para la cobertura del resto de la demanda térmica de baja temperatura será el uso de electricidad del sistema de generación renovable.

Pero al incrementar el nivel térmico de la demanda, las bombas de calor van empeorando sus prestaciones, por lo que en el campo de la demanda de media y alta temperatura dentro del sector industrial ya no son aplicables. En estas condiciones, el aprovechamiento de la electricidad “residual” asociada a la regulación del sistema eléctrico debe hacerse por efecto resistivo¹⁶⁶ puro, que debido a su menor rendimiento aumenta el potencial de integración de la solar térmica para cubrir parte¹⁶⁷ de la demanda restante. Sin embargo, la realidad es que la incorporación de la solar térmica distribuida para esta aplicación añade una considerable rigidez¹⁶⁸ al sistema energético, lo cual trae como consecuencia que las aplicaciones en las que a priori pudiera ser justificable, se limiten a aquellas en las cuales se presente un buen acoplamiento¹⁶⁹ entre el aporte solar térmico distribuido y las necesidades de regulación del sistema eléctrico. Donde no se den estas condiciones, en principio resultaría más apropiado el plantear un esquema basado en la

biomasa y la electricidad residual, combinación que por sí misma proporciona suficiente elasticidad¹⁷⁰ para garantizar la cobertura de la demanda en cualquier situación, y que por tanto parece más apropiada¹⁷¹.

Por tanto, parece que el nicho de la solar térmica en el sector industrial puede verse también considerablemente reducido, y su única opción de una implementación a gran escala parece que queda limitada al hecho de que la combinación biomasa-electricidad “residual” en el campo de la media y alta temperatura condujera a una elevada demanda de biomasa que en nuestro país constituye un recurso renovable muy escaso y con demanda estratégica en el contexto E3.0 para otros sectores como es el sector transporte. Por este motivo la solar térmica en el sector industrial puede adquirir sentido desde la perspectiva de conservación del recurso biomasa para aquellas aplicaciones en que no admita una fácil sustitución por otros recursos provenientes de fuentes renovables. En este caso, la solar térmica debería competir a nivel de costes con la opción hidrógeno procedente de electricidad renovable¹⁷² y electricidad “residual”.

Por último, una opción prioritaria para el uso de la energía solar térmica en la industria (baja y media temperatura¹⁷³), lo constituiría la posibilidad de hacer coincidir geográficamente la implementación de instalaciones industriales y de centrales solares termoeléctricas, de tal forma que éstas pudieran funcionar de forma cogenerativa aprovechando el calor residual del foco frío del ciclo de potencia.

2.6.3.4 Sector transporte

Tal y como analizaremos con detalle más adelante, la electrificación del sector transporte resulta fundamental para contraer la demanda

En efecto, al emplear máquinas de gran tamaño, ya incluso hoy en día nos encontramos con enfriadores que a carga parcial ofrecen COP > 11.

163 En este contexto, el desarrollo de bombas de calor aptas para beneficiarse del efecto de un mayor nivel térmico en el evaporador sería el objeto de una alianza estratégica entre fabricantes de equipos solares y de bombas de calor. En la actualidad las bombas de calor de pequeña potencia para aplicaciones domésticas tienen limitada la temperatura máxima del evaporador en modo calefacción en valores muy bajos que impiden desplegar el tremendo potencial desde el punto de vista de la eficiencia que tendría el incorporar el aporte solar térmico en el evaporador de la bomba de calor. El motivo tecnológico es que emplean compresores herméticos que se enfrían con el gas refrigerante. En grandes máquinas donde los compresores cuentan de refrigeración externa no existe esta limitación, pero puesto que las bombas de calor no están diseñadas para trabajar en estas condiciones, el potencial de mejora en las prestaciones se ve a menudo saturado en valores muy inferiores a lo que podría desarrollar. Sería necesario adaptar el diseño y controles de las bombas de calor para poder sacar todo el beneficio a este acoplamiento con la energía solar térmica. Otro punto en el que puede surgir un nicho de sinergia es en las condiciones de operación que conducen a la producción de hielo en el evaporador de la bomba de calor en condiciones de calefacción. En estas situaciones, las bombas de calor activan un ciclo de desescarche que reduce de forma muy importante su COP. El aporte solar térmico podría emplearse para evitar las condiciones de producción de hielo en el evaporador, y proceder a precalentar el aire antes de su entrada en el intercambiador de la bomba de calor. Esta aplicación podría tener sentido en emplazamientos de elevada severidad climática de invierno, lo cual excluye bastantes zonas climáticas de España. En emplazamientos de menor severidad climática esta aplicación no resulta ventajosa (García-Casals X., 2004; congreso Vigo).

164 En verano, el añadir evaporación mejoraría la capacidad de refrigeración del módulo fotovoltaico, y puede conducir a una mejora del desempeño colector FV/ST.

energética de este sector y mantenerlo dentro de los límites de la sostenibilidad.

En el modo carretera, el dominante desde el punto de vista tanto de la cobertura de la demanda de movilidad de viajeros y mercancías, como del consumo energético, la electrificación es un concepto ganador desde múltiples puntos de vista:

- Permite incrementar de forma notable la eficiencia energética.
- Permite acceder al conjunto de recursos de energías renovables, liberando los requerimientos sobre la biomasa, uno de los recursos renovables más escasos en nuestro país.
- Permite que el sistema eléctrico acceda a un importante potencial de regulación que facilita la integración de energías renovables en el sistema.

De hecho, la electrificación del modo carretera, junto al despliegue de inteligencia en el sector transporte, llega a ser tan importante que nos obliga a reconsiderar los planteamientos actuales de eficiencia, en los que fundamentalmente se busca impulsar un cambio modal desde el modo carretera al modo ferrocarril, para acceder a escenarios con un potencial de eficiencia tremendamente superior a lo que permite el desplazamiento modal anteriormente comentado¹⁷⁴.

2.7 Mix 100% renovables en el contexto E3.0

En el informe (GP, 2007) analizamos la viabilidad técnica y económica de cubrir la demanda de energía eléctrica con energías renovables. En ese caso se trataba del primer

análisis de la viabilidad de los sistemas eléctricos 100% renovables, por lo que se adoptó el planteamiento conservador de no involucrar a la demanda en la operación del sistema eléctrico, es decir, se empleó un enfoque convencional desde el lado de la oferta en el que todo el peso de la operación y regulación del sistema caía sobre las centrales de generación, y en el que la demanda evolucionaba de forma ciega a los requerimientos del sistema de generación. Evidentemente este planteamiento original está lejos del óptimo en el que debe operar un sistema energético inteligente, pero cumplía el objetivo de mostrar que incluso en estas condiciones altamente desfavorables era factible y viable operar un sistema eléctrico alimentado exclusivamente con energías renovables, regulando de forma convencional desde el lado de la generación y con todas las garantías requeridas para la cobertura de la demanda, y por tanto no era preciso esperar a que tuviera lugar ningún cambio radical en la forma de responder de la demanda para iniciar la transición hacia un sistema 100% renovable.

Bastantes cosas han sucedido desde que en el año 2006 se publicara el informe *Renovables 100%*, y una de ellas es que la mayor parte de los actores de nuestra sociedad han empezado a percibir claramente por primera vez la urgencia de la transición hacia un sistema energético 100% renovable, habida cuenta de los requerimientos ya incuestionables¹⁷⁵ que nos impone nuestro sistema climático. Y en esta tesitura se ha empezado a focalizar de forma intensa la mirada en el desarrollo y despliegue de las redes inteligentes. Ahora, a diferencia del planteamiento mayoritario establecido en 2006, resulta evidente que la demanda debe tomar un papel activo muy importante para facilitar la transición de nuestro sistema en los cortos plazos de tiempo disponibles.

165 De hecho, en el sector industrial la demanda de calor se extiende a todo el año, por lo que en verano el rendimiento con el que actúan las bombas de calor es todavía más elevado.

166 Al aprovechar la electricidad por efecto Joule, tenemos COP = 1.

167 De hecho, en este esquema el planteamiento debería ser para cubrir el total de la demanda con solar térmica y efecto Joule asociado principalmente a la regulación del sistema eléctrico, pues de lo contrario sería preciso incorporar una tercera tecnología, que en el contexto E3.0 tan solo podría ser la biomasa, para proporcionar la necesaria garantía de suministro. Y una vez incurrida la inversión en el sistema de biomasa, la solar térmica ya no sería justificable.

168 En el sentido de que el aporte solar térmico sobre el sistema de acumulación térmica pasa a ser prioritario, reduciendo el campo de aplicación de la DSR para regular el sistema eléctrico.

169 Es decir, que la cobertura de la demanda se pueda garantizar con suficiente fiabilidad empleando el aporte solar descentralizado y electricidad "residual", lo que requiere una limitada participación de electricidad no "residual" para proporcionar la garantía de resultados.

170 Esta elasticidad se ve reducida cuando se imponen condiciones de eficiencia sobre el uso de un recurso escaso como es la biomasa, lo cual requeriría su aplicación cogenerativa, que en el contexto E3.0 debería ir guiada por las necesidades del sistema eléctrico. Sin embargo, incluso en este caso resulta una combinación tecnológica más favorable que la de la solar térmica distribuida y la electricidad "residual", pues proporciona capacidad de regulación hacia arriba y hacia abajo a la GDE de ese sector industrial de forma complementaria: En efecto, cuando el sistema eléctrico requiere más generación eléctrica (regulación hacia arriba), arrancaría la cogeneración proporcionando por un lado esa electricidad y obteniendo por otro lado el calor demandado por la aplicación industrial, y cuando el sistema eléctrico tuviera capacidad de generación excedentaria (regulación hacia abajo), la demanda térmica de la industria se cubriría empleando esa electricidad "residual" (DSR).

171 Para el caso de demanda térmica de media temperatura

Y el hecho de que en el contexto E3.0 la demanda aparezca como un actor muy importante en la operación del sistema energético, modifica significativamente las condiciones de contorno en las que se va a desarrollar el mix de generación 100% renovable, motivo por el cual cabe esperar que la composición de esos mix 100% renovables puedan experimentar modificaciones significativas.

Otros hechos que pueden afectar a la configuración de los mix de generación 100% renovables son los siguientes:

- A diferencia de en el informe *Renovables 100%*, ahora consideramos el sistema energético total, con una gran electrificación del sistema energético, y muchos grados de participación de la DSR¹⁷⁶ en distintos subsectores gracias a la inteligencia desplegada por los sistemas energético y económico.
- Los recursos de biomasa en el contexto E3.0 deben emplearse de forma prioritaria para aquellos subsectores energéticos en los que la participación de otras renovables requiere incurrir en pérdidas de rendimiento significativas por apoyarse en otro vector energético (como el hidrógeno), y como complemento a la regulación del sistema una vez apuradas las posibilidades de la regulación desde el lado de la demanda.
- La fotovoltaica ha demostrado unos ritmos de implementación muy elevados, del orden de los requeridos para materializar la transición del sistema energético en los plazos disponibles.
- La solar termoeléctrica no ha conseguido acercarse a los ritmos de crecimiento requeridos, y a lo largo del año 2009 recibió un frenazo de grandes proporciones por el lado de la administración¹⁷⁷, que de forma

totalmente incomprensible a la luz de los requerimientos actuales¹⁷⁸, ha paralizado su desarrollo hasta más allá del año 2013. Debido a las grandes inercias asociadas al desarrollo de la tecnología termosolar, este frenazo justo en la etapa de despegue inicial, junto con la sensación de inseguridad regulatoria que ha transmitido nuestra administración, y la escasez a nivel internacional de recursos financieros para abordar este tipo de centrales, probablemente traiga como consecuencia que la tecnología termosolar no pueda desempeñar el papel que se esperaba de ella.

Para focalizar mejor esta situación, recopilamos a continuación algunos resultados de los anteriores trabajos que analizaban los sistemas de generación 100% renovables:

La figura 44 muestra el despacho de generación para un mix 100% renovable, optimizado económicamente, para cubrir la demanda del escenario 2050 en el informe *Renovables 100%*. Como podemos ver se trata de un mix energético relativamente poco diverso, donde la tecnología eólica terrestre, respecto a su situación inicial de partida como a su curva de evolución de costes prevista, domina la generación. En segundo lugar aparecía la tecnología termosolar hibridada con biomasa (el aporte de biomasa que aparece como cuarta contribución es el correspondiente a la hibridación), que junto a la hidroeléctrica regulada y el bombeo hidroeléctrico proporcionaba la capacidad de regulación del sistema eléctrico desde el lado de la generación. El resto de tecnologías que aparecen son la minihidráulica y la hidráulica fluyente que ya existen en la actualidad. Como vemos, en este mix de generación, tanto por costes como por incapacidad de contribuir a los requerimientos de regulación no aparecen el resto de las tecnologías renovables, y en particular no hay

(hasta 400-500 °C), la combinación ideal sería la cogeneración basada en biomasa con la electricidad "residual" del sistema eléctrico: integración total del sistema energético con capacidad de regulación hacia arriba y hacia abajo. Para el caso de la demanda térmica de alta temperatura, la cogeneración ya no permitiría alcanzar niveles térmicos suficientes, por lo cual debería emplearse electricidad "residual" por efecto Joule junto con combustión de la biomasa.

172 Esta combinación también presenta una mejor integración con el sistema energético total, pues el hidrógeno se podría generar también basándose en electricidad "residual", y en su aplicación dentro de la industria, en el campo de la media temperatura permitiría un enfoque cogenerativo que proporcionaría, al igual que la biomasa, un potencial de regulación hacia arriba.

173 Para los ciclos de potencia actualmente implementados en las centrales termosolares (ciclo de vapor de agua), el alcance quedaría limitado a la baja temperatura para no perjudicar el rendimiento eléctrico. Sin embargo, en el futuro, con la aplicación de ciclos de turbina de gas alimentados por receptores solares de torre, esta aplicación podría extenderse a la media temperatura.

174 Esta afirmación no implica que haya que abandonar la presión para materializar este desplazamiento modal tanto como sea posible, que tanto para el proceso de transición como para el contexto E3.0 constituye una estrategia adecuada. Simplemente resalta el hecho de que la electrificación e introducción de inteligencia en el transporte por carretera libera grados de libertad y eficiencia adicionales que a su vez pueden facilitar un mayor alcance del desplazamiento modal hacia el ferrocarril al acercarlo a la demanda.

175 El cuarto informe del IPCC publicado en 2007 planteó ya de forma incuestionable este hecho, y la evolución del sistema climático en los dos años siguientes, que aceleró considerablemente los efectos que predecían los modelos, ha hecho crecer la conciencia sobre la urgencia del proceso de cambio requerido.

176 DSR: Demand Side Response. La gestión de la demanda participando de forma activa en la operación del sistema energético.

177 La solar fotovoltaica también ha recibido un frenazo parecido

contribución alguna de la fotovoltaica. Ya en el marco del informe *Renovables 100%* apuntábamos a que más allá de la optimización téc-

nico-económica, parecía recomendable apuntar a una mayor diversidad de los mix de generación basados en renovables.

Figura 44. Despacho de la generación para un mix 100% renovable optimizado económicamente (García-Casals, X., 2006) para el sistema eléctrico peninsular (demanda eléctrica 280 TWh/a).

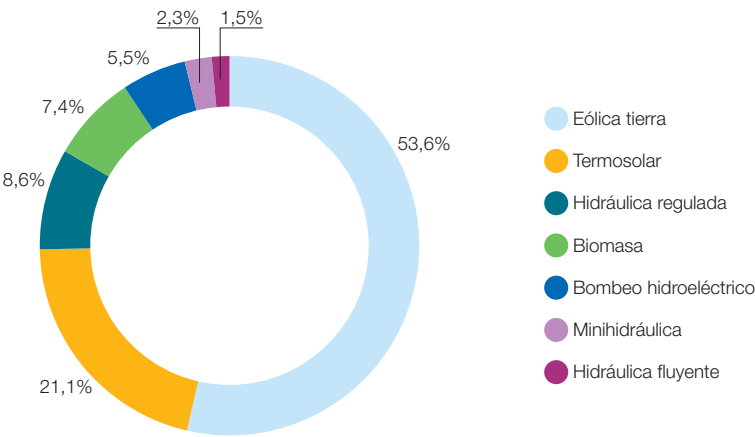
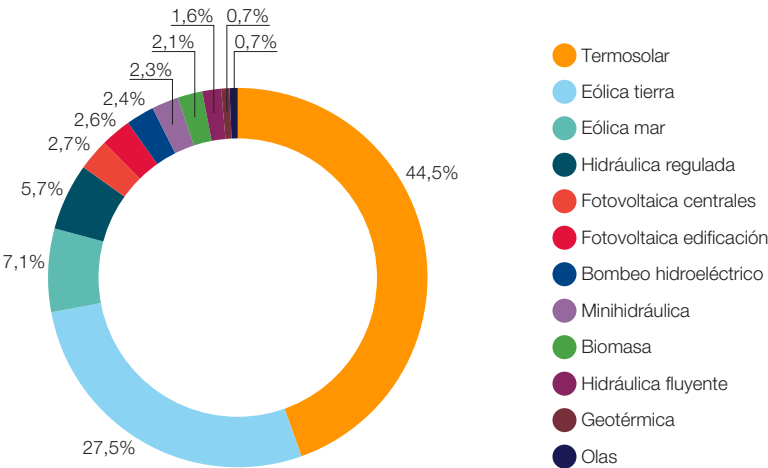


Figura 45. Despacho de la generación para el mix 100% renovable planteado en (García-Casals X., 2009) para el sistema eléctrico peninsular bajo el escenario de demanda media (280 TWh/a).



por el lado de la administración, pero su carácter modular y menores tiempos de desarrollo de las centrales de esta tecnología hacen pensar que tendrá una mayor capacidad de recuperación.

178 Realmente resulta increíble que tan solo un par de años después de la publicación del informe *Renovables 100%*, hayamos podido constatar que prácticamente todos los ingredientes necesarios para desarrollar un escenario 100% renovable (tecnología, industria, capacidad de financiación, etc.) han demostrado estar a la altura de las necesidades para materializar el proceso de cambio. Los únicos elementos que no han estado a la altura de las circunstancias, y que de hecho se han manifestado como una barrera de grandes proporciones para hacer posible el cambio, han sido los sistemas administrativo y político, es decir, aquellos que deberían estar en primera línea intentando catalizar el proceso de cambio. Esto es una clara indicación de la urgencia en introducir inteligencia en estos sistemas.

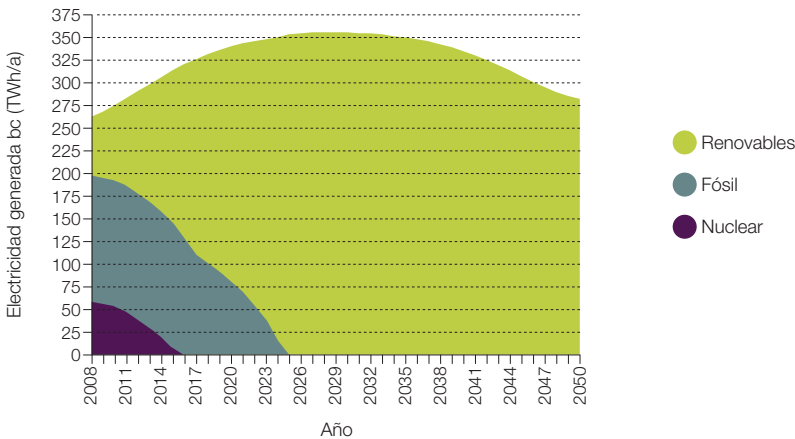
En (García-Casals X., 2009) se analizaron los sistemas de generación basados en renovables, desarrollando escenarios del proceso de transición del mix de generación desde su situación actual hasta alcanzar el 100% renovable, de cara a poder poner fechas a las posibilidades de sustitución de las centrales nucleares y fósiles.

Una vez más se trataba de un análisis convencional, en el que la demanda se suponía ciega a los requerimientos del sistema energético, y los recursos para la regulación del sistema procedían en su totalidad del lado de la generación. En la figura 45 podemos ver el despacho del mix para el escenario de demanda eléctrica media¹⁷⁹ (280 TWh/a). Como podemos ver es un mix energético en el que se ha antepuesto el criterio de diversidad sobre la optimización económica, y que se encuentra dominado por la tecnología termosolar debido

fundamentalmente a la capacidad de regulación del sistema que proporciona al ser híbrida con biomasa, pero también a la abundancia de su recurso y a su favorable curva de evolución de costes. La fotovoltaica aparece en este mix como la cuarta tecnología renovable por lo que respecta a la cobertura de la demanda, con una contribución del orden de la de la hidroeléctrica regulada, pero muy alejada de las contribuciones de la eólica y la termosolar.

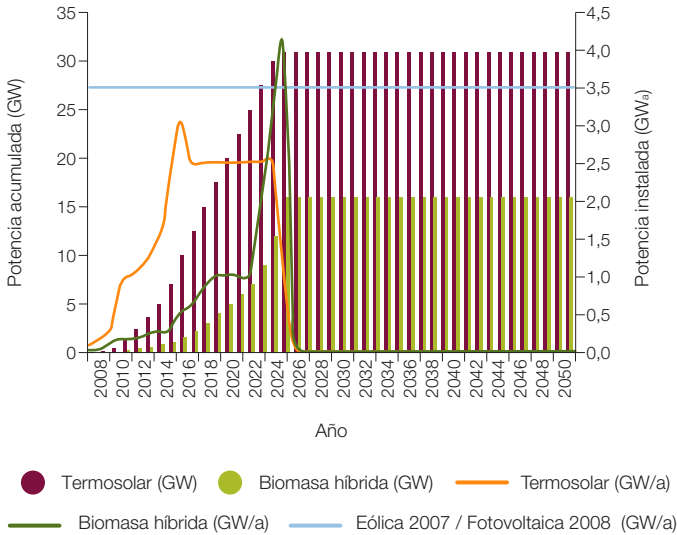
Con el objetivo de desarrollar este mix de cara a la cobertura de la demanda eléctrica en el año 2050, y haciendo un uso más intensivo de la hibridación termosolar con biomasa en los años intermedios del escenario para afrontar el pico de demanda eléctrica existente, el escenario de capacidad de sustitución de los parques de generación nuclear y fósil, quedaba como muestra la figura 46, en la que

Figura 46. Escenario de evolución del despacho de generación eléctrica planteado en (García-Casals, X., 2009) para el sistema eléctrico peninsular, bajo el escenario de demanda media (280 TWh/a), y con un uso intensivo de la hibridación termosolar con biomasa en la parte media del escenario para acelerar el cierre de las centrales de combustible fósil.



¹⁷⁹ En (García Casals X., 2009) se empleaban tres escenarios de demanda eléctrica (baja, media y alta) para acotar las posibles evoluciones de la demanda.

Figura 47. Requerimientos de instalación de potencia renovable para desarrollar el escenario de sustitución de las centrales nucleares y fósiles planteado en (García-Casals X., 2009) para el sistema eléctrico peninsular bajo el escenario de demanda media (280 TWh/a).



como podemos ver se completaba el cierre del parque nuclear en el año 2016 y el del parque fósil en el año 2025.

Y para poder desarrollar este escenario de sustitución de los parques nuclear y fósil, los ritmos de desarrollo de la capacidad renovable de las tecnologías dominantes en este mix son los que aparecen recogidos en la figura 47, donde podemos observar cómo el ritmo de crecimiento anual para la tecnología dominante de este mix, la termosolar, presentaba un pico de potencia anual instalada que quedaba por debajo de los máximos de instalación de potencia anual en nuestro país ya demostrados por las tecnologías eólica y fotovoltaica en años anteriores. Es decir, los ritmos de desarrollo requeridos para materializar un escenario de este estilo son perfectamente alcanzables por la industria de las tecnologías renovables en nuestro país y, como se ha demostrado en el año 2009, la única barrera que puede impedir que

alcancemos estos ritmos de crecimiento es la administración.

Volviendo ahora al contexto E3.0, la liberación de la DSR como recurso de regulación, mediante la distribución de inteligencia por los sistemas energético y económico, modifica significativamente uno de los requisitos previos que condicionaban la configuración de los mix 100% renovables propuestos en los estudios anteriores: en efecto, bajo el contexto E3.0 ya no se impone la restricción de que la regulación deba venir desde el lado de la generación. Y el planteamiento generalmente aceptado en la actualidad en relación al despliegue de la inteligencia por la red eléctrica, apunta a que este recurso se considera como imprescindible para materializar la evolución requerida de nuestro sistema energético, y por tanto que debemos contar con él para configurar nuestros mix de generación 100% renovables.

Por otro lado, la gran electrificación del sistema energético planteado en el contexto E3.0, libera gran parte del recurso de superficie de envolvente de los edificios para instalar sistemas solares fotovoltaicos, puesto que la participación de los sistemas solares térmicos de baja temperatura se verá principalmente limitada a la cobertura parcial de ACS a la que opten durante el proceso de transición.

Y por último, la fotovoltaica ha mostrado en el año 2008 su capacidad para alcanzar unos ritmos de crecimiento del orden de los requeridos para materializar la transición del sistema energético en los plazos requeridos, y si bien ha recibido un gran revés de la administración truncando significativamente estos ritmos de crecimiento en el año 2009, la elevada velocidad de respuesta de esta tecnología hace pensar que cuando se eliminen las barreras administrativas pueda volver a implementar esos ritmos de crecimiento¹⁸⁰.

Por todo lo expuesto en este punto, cabe esperar que en el contexto E3.0 la participación de la fotovoltaica en los mix de generación 100% renovables sea sensiblemente superior a la manejada en estudios anteriores.

2.8 Economía sostenible: activación de mecanismos de respuesta rápida

La introducción de inteligencia en el sistema económico constituye uno de los principales mecanismos de respuesta rápida para que el sistema energético evolucione hacia la eficiencia y las renovables. Por el contrario, la ausencia de inteligencia en el sistema económico y su evolución BAU, más allá de privarnos de estos mecanismos de respuesta rápidos, nos somete a una gran fuerza en dirección contraria a la que deberíamos adoptar, anulando con

creces el beneficio que nos pudieran aportar otras medidas encaminadas a estimular la eficiencia, e imposibilitando que abandonemos la senda BAU que nos ha conducido a la situación límite actual.

En efecto, mientras la estructura del sistema económico no se encuentre alineada con los objetivos de eficiencia y sostenibilidad, todas las otras actuaciones en la dirección de promover la eficiencia se quedarán probablemente en un ligero maquillaje sin capacidad de cambio estructural. Pero si conseguimos alinear el sistema económico con estos objetivos, la transición hacia la senda deseada acontecerá a una velocidad muy superior a la de la evolución BAU.

El sistema económico actual descansa completamente sobre la venta de productos, resultando ciego a la cobertura de los servicios para los que supuestamente se venden esos productos. De hecho, si bajan las ventas de productos, a pesar de que los servicios sigan cubriéndose, se desencadenan contextos de crisis. Esta situación es un caldo de cultivo ideal para que proliferen gran cantidad de ineficiencias en el uso de los recursos, puesto que quien vende los productos no recibe ninguna señal económica positiva en relación a la eficiencia con la que ese producto cubre el servicio demandado, sino más bien todo lo contrario: cuanto más ineficiente sea la cobertura del servicio, a menudo mayor cantidad de producto venderá y mejorará el rendimiento económico de esa actividad empresarial.

En nuestro entorno inmediato podemos detectar multitud de ejemplos de estas ineficiencias estructurales en el uso de los recursos:

- El promotor y constructor que desarrollan un edificio y lo ponen a la venta en el mercado,

¹⁸⁰ Y además, el frenazo administrativo del año 2009 puede incluso tener un efecto positivo propiciando la maduración del sector, de tal forma que cuando vuelva a alcanzar elevados ritmos de crecimiento, si la inteligencia administrativa acompaña, lo haga de forma más efectiva que en el año 2008.

no tienen responsabilidades ni repercusiones asociadas al consumo de energía ni capacidad de cubrir los servicios de confort y calidad del ambiente interior que ese edificio proporcione a sus usuarios en el futuro. Es más, a menudo la maximización de su beneficio económico pasa por sacrificar tanto la capacidad futura del edificio de cubrir los servicios de confort y calidad ambiente, como por incrementar la energía de operación del edificio como consecuencia de minimizar las inversiones iniciales. En un sistema económico inteligente los ingresos de esta actividad quedarían directamente vinculados a la cobertura de los servicios para los que se adquiere el edificio, por lo que la maximización del beneficio pasaría por minimizar el consumo energético en el ciclo de vida del edificio.

- La compañía comercializadora que nos vende la electricidad en casa, incrementa su beneficio cuanta más electricidad consumamos, y al mantener una estructura tarifaria que desincentive el ahorro en relación a la potencia instalada, y sin ninguna señal económica para integrar la gestión y respuesta de la demanda en la operación del sistema. En un sistema económico inteligente, los ingresos de esta actividad quedarían vinculados a la cobertura de los servicios para los que se suministra la electricidad, por lo que la maximización del beneficio pasaría por la minimización de la electricidad necesaria, y por la integración de la demanda en la operación del sistema eléctrico.
- El fabricante de coches tiene unos beneficios proporcionales a la cantidad de vehículos vendidos, sin ninguna señal económica positiva relacionada con la eficiencia con la que estos vehículos cubren la demanda de movilidad. De hecho, la situación actual es más bien la contraria: cuanto

menor es el factor de capacidad con que se use ese vehículo, y por tanto menor su eficiencia en la cobertura de la demanda, mayor será el beneficio obtenido. De igual forma, cuanto menor sea la vida útil del vehículo¹⁸¹, mayor será el beneficio. En este contexto, las medidas de eficiencia a nivel vehículo se deben introducir por regulación a un ritmo muy por debajo de las posibilidades reales, como situación de compromiso entre las presiones del *lobby* correspondiente y los requerimientos de internalización del impacto ambiental asociado. En un sistema económico inteligente, los ingresos de esta actividad quedarían vinculados a la cobertura de la demanda de movilidad, o incluso más allá, a la cobertura de la accesibilidad, por lo que el beneficio del fabricante de coches se maximizaría al reducir la cantidad de vehículos fabricados para cubrir esa demanda, y al minimizar el consumo energético de operación necesario para cubrir la demanda.

Estos y otros ejemplos similares que podemos identificar a nuestro alrededor, nos ilustran la diferencia estructural entre una economía basada en la venta de productos, que podemos calificar como totalmente carente de inteligencia porque simplemente no ve más allá de la elaboración del producto, y una economía basada en prestaciones que incorpora inteligencia para ver e internalizar el efecto global de los productos que elabora.

Pero el sistema económico no es capaz por sí solo de reconvertirse en la dirección de una economía sostenible basada en prestaciones. Para ello precisa de la participación de un sistema político inteligente que articule las señales adecuadas para que puedan echar raíces los planteamientos de economía sostenible, y de un sistema administrativo capaz de gestionar y acompañar esa transición.

181 Mientras quede dentro de los márgenes aceptables para no espantar al consumidor hacia otro fabricante. La vida útil del vehículo se reduce tanto por el deterioro del mismo como principalmente por quedar desfasado en relación a los nuevos modelos que aparecen en el mercado.

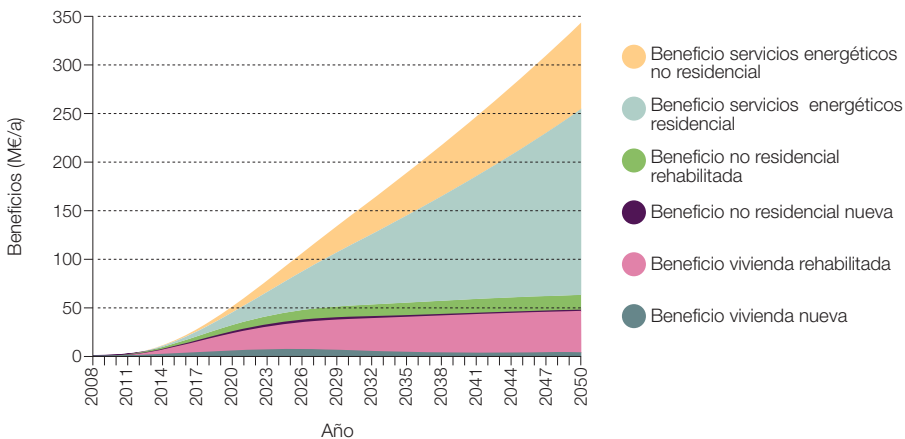
Lamentablemente, esta situación queda muy alejada de las realidades política y administrativa en nuestro país tal y como claramente ha ilustrado el boicoteo y sabotaje del despegue de las energías renovables en España. Pero los sistemas político y administrativo son altamente “renovables”, por lo que en el fondo bastan las señales adecuadas del sistema social para darles un vuelco completo, de tal forma que en última instancia la capacidad de materializar un cambio de este estilo en el sistema económico recae sobre todos y cada uno de nosotros.

Como ejemplos de la estructuración y ventajas de un sistema económico inteligente, hemos recogido aquí algún resultado de (García Casals X., 2009) en el que se analizaron tres líneas de negocio de economía sostenible: edificación eficiente, gestión de la demanda del parque edificatorio, y movilidad eficiente. El contexto y alcance de las líneas de negocio analizadas es el de una actividad empresarial que se desarrolla y abarca parte del mercado de una Comunidad Autónoma

(CCAA)¹⁸², así como el periodo hasta el año 2050.

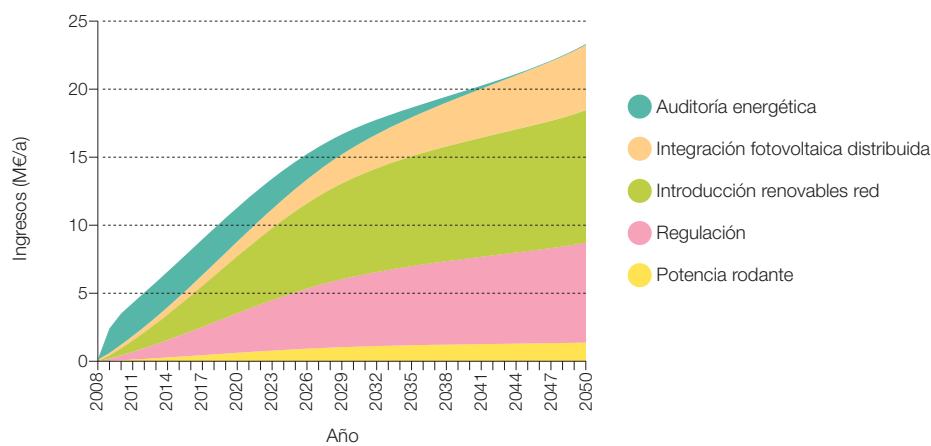
La figura 48 nos presenta la estructura de beneficios¹⁸³ de una empresa dedicada a la edificación eficiente en el contexto en el que nos ha quedado después del paso de la crisis inmobiliaria, que al final del escenario llega a hacerse con el 30% del mercado en esa CCAA. Las líneas de negocio de la empresa son, por un lado, los convencionales de la promoción y venta de edificios residenciales y no residenciales, a la que se añaden las actividades de rehabilitación de edificios, que como vemos pasan a dominar ampliamente los beneficios dentro de la actividad de “construcción”. Los edificios promovidos por esta empresa presentan un importante diferencial de eficiencia en relación al parque existente y al resto de edificios promovidos en el mercado, por lo que el propio promotor del edificio puede ofrecer como producto la cobertura de los servicios energéticos solicitados en estos edificios con un amplio margen de beneficios, incluso garantizando un precio fijo y favorable

Figura 48. Evolución de los beneficios asociados a las distintas líneas de negocio de una empresa dedicada a la edificación eficiente (García Casals X., 2009).



¹⁸² En concreto para estos casos la CCAA analizada fue la de Navarra.
¹⁸³ En € corrientes.

Figura 49. Evolución de los ingresos asociados a las distintas líneas de negocio de una empresa dedicada a la gestión de la demanda (agregación de la demanda) del sector edificación (García Casals X., 2009).



dentro del mercado para el usuario final¹⁸⁴. A medida que va incrementándose el parque de edificios promovido y operado por esta empresa, las líneas de negocio de cobertura de los servicios energéticos se convierten con gran diferencia en las líneas dominantes en la estructura de beneficios de la actividad empresarial: el beneficio se maximiza con el despliegue de la eficiencia, por lo que este alineamiento entre el sistema económico y los objetivos de eficiencia constituye la mejor garantía para un completo y rápido despliegue de la eficiencia.

En la figura 49 reproducimos el resultado del análisis del desarrollo de las líneas de ingresos de una empresa dedicada a la gestión de la demanda energética del parque de edificios, es decir, un agregador de la demanda, que a lo largo del escenario temporal considerado llega a abarcar el 30% del mercado en esa CCAA.

El agregador de la demanda y la generación distribuidas, situándose entre medias del

consumidor final de electricidad y de las compañías comercializadoras y distribuidoras de energía, articula la integración de la demanda en la operación del sistema a un ritmo y con un alcance muy superior al que se podría aspirar sin la introducción de este nuevo actor. Mediante la agregación de un gran número de pequeños usuarios se configura como una gran central virtual con capacidad de proporcionar servicios complementarios al sistema eléctrico (regulación hacia arriba y hacia abajo, potencia rodante, integración de renovables, etc.) a gran escala y de forma predecible. Mediante la retribución a los usuarios finales de sus servicios de gestión de la demanda articulan el mecanismo de mercado que permite acceder a todo el potencial de la gestión y respuesta de la demanda, y añaden valor a esta capacidad de respuesta de la demanda por su agregación, efecto de simultaneidad, comunicación con el resto del sistema y actuación inteligente en función de las necesidades, lo que proporciona al sistema energético servicios adicionales con una

184 Con el valor añadido de estabilidad de precios que esto supone para el usuario del edificio en un entorno de precios energéticos en incremento.

gran flexibilidad que se adaptan perfectamente a las necesidades de un sistema energético basado en renovables.

Además de los servicios complementarios de regulación convencional al sistema eléctrico, destacan en la actividad de esta empresa los servicios de integración de renovables tanto del resto del sistema energético como de la generación distribuida en su área de actuación. Por lo que respecta al primero, el agregador de la demanda articula la respuesta de la demanda basándose en la capacidad de generación instantánea de centrales de generación renovable fuera de su ámbito geográfico, de forma genérica a partir de una señal del operador del sistema, o de forma particular mediante contratos bilaterales con operadores de centrales de generación renovable: cuando hay exceso de capacidad de generación renovable, para evitar la operación en modo regulación por el lado de la

generación, se articula la respuesta de la demanda para absorber esa generación “excedente”. Por lo que respecta a la generación distribuida dentro de su ámbito geográfico y contractual, regula la respuesta de la demanda para poder ofertar una generación equivalente gestionable, configurando una central virtual mediante la combinación inteligente entre generación y demanda.

Como podemos observar en la figura 49 a parte de una pequeña línea de negocio basada en las auditorías energéticas, que fundamentalmente sirve para impulsar el lanzamiento de esta actividad hasta disponer de una masa crítica de edificios participando en el programa de gestión de la demanda, el grueso de los ingresos del agregador de la demanda vienen por la prestación de servicios complementarios al sistema eléctrico, y muy especialmente por el servicio de integración de renovables del resto de la red.





imagen

Detalle de los mandos de un vehículo convencional. El modelo energético E3.0 apuesta por el desarrollo de un sistema de transporte inteligente (STI).

© PEDRO ARMESTRE

Escenarios

3

En este punto pasamos a desarrollar los escenarios que configuran la parte fundamental de este trabajo.

3.1 Generalidades sobre los escenarios

En este trabajo hemos dedicado bastante esfuerzo a desarrollar escenarios, tanto bajo un contexto continuista que denominamos BAU, como bajo un contexto de eficiencia que denominamos E3.0, que nos permitan adquirir una perspectiva de las posibilidades en las que se nos podría desplegar el futuro energético.

Los escenarios, apoyándose en la evolución histórica pero incorporando el efecto de potenciales mecanismos de cambio, si bien como tales escenarios que son no dejan de ser hipotéticas trayectorias de evolución futura sin capacidad de discernir cual será la trayectoria que finalmente seguiremos, tienen la capacidad de aportarnos evaluaciones cuantificadas del efecto de diversas actuaciones, y de permitirnos una toma de conciencia sobre el potencial de distintas aproximaciones.

De esta forma, los escenarios pueden permitirnos romper tabúes tales como el planteamiento derrotista de que en la situación actual del mundo, con grandes economías emergentes y la economía de los países desarrollados en crisis, no hay más opción que seguir por la senda BAU que nos ha llevado al límite del abismo. Otras realidades son posibles, y los escenarios al desplegarlos y cuantificarlos su potencial, nos permiten tomar conciencia del peso que pueden tener y de las opciones de modificar el statu quo que nos brinda, de tal forma que no abandonemos de antemano con una actitud derrotista la opción de perseguir estas otras realidades.

En este sentido, la aportación relevante que nos pueden proporcionar los escenarios es la asociación cuantificada entre resultados finales y medios / mecanismos que es preciso poner en práctica para alcanzar estos resultados. Ello nos proporciona criterio para iniciar el recorrido por las líneas de evolución que potencialmente nos pueden conducir a plasmar estos escenarios en una realidad.

3.1.1 Escenarios de integración de renovables y eficiencia

La eficiencia en el uso de los recursos es una característica de la inteligencia.

En el informe *Renovables 100%* presentamos diversos escenarios en los que se comprobaba la viabilidad técnica y económica de cubrir totalmente la demanda eléctrica BAU basándose en energías renovables, sin participación alguna de la gestión de la demanda y con una penetración muy limitada de las medidas de eficiencia energética en el consumo de energía.

En este informe, por un lado planteamos el conjunto del sistema energético, y por otro lado exploramos las posibilidades y potencial de la incorporación de inteligencia global en el funcionamiento de nuestros sistemas: el objetivo es cubrir unos servicios¹⁸⁵ requeridos para el funcionamiento de nuestra sociedad con el mínimo uso de recursos.

Por tanto, la eficiencia energética y la participación activa de todos los actores (gestión de la demanda) forman una parte esencial de los planteamientos en los escenarios E3.0 de este informe, lo que conduce a una gran reducción de los recursos renovables que es preciso movilizar.

Esta reducción de recursos renovables a utilizar, tiene consecuencias favorables desde

¹⁸⁵ El objetivo son los servicios, y no la demanda energética asociada con la que actualmente cubrimos estos servicios.

diversos aspectos: ocupación del territorio por la infraestructura de generación y transporte, movilización de recursos financieros para acometer las inversiones necesarias, uso de materiales para construir los equipos de generación requeridos, etc.

Adicionalmente, esta reducción tiene la capacidad de introducirnos realmente en una senda de sostenibilidad, limitando nuestra demanda a los recursos disponibles. En efecto, en el informe *Renovables 100%* constatamos que el potencial de las energías renovables en nuestro país nos permitiría cubrir de forma holgada¹⁸⁶ la demanda energética en el escenario para el año 2050 que allí desarrollamos. Pero en principio aspiramos a que la historia de la humanidad no se acabe en el año 2050, por lo que al mantener las trayectorias tendenciales de crecimiento mantenido de la demanda energética antes o después¹⁸⁷ agotaríamos el potencial de las energías renovables en nuestro país, por lo que nuestro sistema energético seguiría sin ser sostenible.

Pero es más, según las aproximaciones que adoptáramos para cubrir con renovables la demanda energética BAU, al requerir una participación mayor de algunas fuentes renovables particularmente escasas en nuestro país, incluso para el año 2050 no tendríamos capacidad de cubrir la demanda BAU¹⁸⁸.

Por último, desde el punto de vista económico, si bien la contención y contracción de la demanda mediante incorporación de medidas de eficiencia, y la involucración activa de la demanda en la operación del sistema energético pueden conducir a un incremento del coste de la unidad de energía producida, el coste total obtenido como producto de la energía producida y su coste unitario es considerablemente inferior, y lo mismo sucede por cantidad absoluta de servicio proporcionado¹⁸⁹.

3.1.2 Escenarios macro y de abajo-a-arriba

Tradicionalmente existen dos aproximaciones para elaborar escenarios: las macro y las de abajo-a-arriba.

Por un lado encontramos las aproximaciones macro, que buscan correlacionar la variable dependiente sobre la que se quiere elaborar el escenario con algún indicador macro del cual ya se dispone de escenarios. Un ejemplo muy típico en el campo de los escenarios energéticos es buscar correlacionar la demanda de energía con el PIB. Las aproximaciones macro tienen la virtud de “empaquetar” la complejidad de las interacciones del mundo real en un solo parámetro sobre el cual ya se tiene una proyección de la evolución futura¹⁹⁰, y basándose en el análisis histórico de cómo se ha correlacionado este parámetro con la variable independiente en estudio se procede a su proyección.

Sin embargo, esta virtud de los análisis macro es también una gran debilidad, pues están muy limitados para incorporar los efectos de cambios estructurales que afecten a la variable independiente bajo análisis. Y en el caso que nos ocupa, la introducción de eficiencia y ahorro muy a menudo va ligada a cambios estructurales que no puede recoger una aproximación macro.

Por este motivo, la mayoría de escenarios que vamos a elaborar en este estudio parten de una aproximación de abajo-a-arriba, en la que se aplican cambios estructurales en múltiples variables independientes y mediante modelado se evalúa el correspondiente cambio en la variable dependiente bajo análisis.

Sin embargo, en aquellos casos en que nos parezca adecuado, apoyaremos los procesos

¹⁸⁶ En concreto, el potencial de las renovables quedaba cuantificado como 56,4 veces la demanda de energía eléctrica BAU en 2050, o 10,4 veces la demanda de energía total proyectada para el año 2050.

¹⁸⁷ Más bien antes tal y como ilustramos con un ejemplo más adelante.

¹⁸⁸ Este punto lo ilustramos más adelante con un análisis de las opciones de cubrir la demanda energética del sector edificación basándose en una aproximación descentralizada de la aplicación de las renovables, que agotaría las posibilidades del recurso de la biomasa antes de llegar al año 2050.

¹⁸⁹ Tal y como muestran los ejemplos de modelo de negocio desarrollados en los anexos.

¹⁹⁰ Esperada o deseada.

de extrapolación o contrastación en planteamientos macro para algunas de las variables consideradas.

3.1.3 Escenarios BAU y eficientes

En este estudio presentamos múltiples escenarios sectoriales y subsectoriales para acabar configurando con ellos los escenarios de demanda energética.

Fundamentalmente diferenciamos entre dos contextos para desarrollar los escenarios: el contexto BAU y el contexto E3.0.

Los escenarios planteados bajo el contexto BAU son escenarios que reflejan las tendencias actuales asociadas a un compromiso limitado con la reducción de emisiones. Si bien podemos interpretarlos como escenarios tendenciales a partir de la situación actual, son BAU más progresistas que los que podríamos haber esbozado hace unos pocos años, con tendencias que apuntan en la dirección correcta pero con insuficiente intensidad.

Los escenarios planteados bajo el contexto E3.0 son escenarios de evolución del consumo energético bajo planteamientos de eficiencia energética, presuponiendo que los cambios estructurales necesarios para internalizar las medidas de eficiencia propuestas pueden aplicarse instantáneamente. Por tanto, para un año dado, el paso del BAU al E3.0 requeriría cambios en escalón que no siempre son posibles de implementar.

Sin embargo, es preciso tener en cuenta dos aspectos:

- La introducción de inteligencia en los sistemas energético, económico, político y social constituye uno de los elementos fundamentales

de los planteamientos E3.0. Y esta introducción de inteligencia sí que permite materializar cambios en escalón que son impensables bajo la perspectiva BAU. De hecho, dadas las grandes restricciones que nos impone la inactividad a nivel global para atajar las causas del cambio climático, es muy probable que la única opción que nos quede a estas alturas es la implementación de cambios en escalón. En este sentido, los saltos finitos del contexto BAU al contexto E3.0 para un año dado pasan a ser más viables de lo que aparentan en un principio.

- Por otro lado, los escenarios BAU y E3.0 en general no son escenarios de transición, sino escenarios extremos¹⁹¹. La idea fundamental es que de acuerdo con los escenarios extremos BAU y E3.0 posteriormente se puede elaborar cualquier escenario de transición sin más que asignar un escenario de tasa de transición del BAU al E3.0 que vaya desde un 0% en el instante actual hasta el porcentaje de máxima transición a un contexto E3.0 para el final del escenario que se pretenda analizar. En este sentido, cuando resulte procedente distinguiremos entre escenarios de tecnología E3.0, y escenarios E3.0 que ya incorporen un escenario de transición desde el contexto BAU.

3.1.4 Escenarios de transición

Como comentábamos en el punto anterior, a menudo se nos presentan escalones finitos desde el inicio de los escenarios entre las evoluciones BAU tendenciales y los escenarios de tecnología E3.0. En concreto, siempre que el contexto E3.0 implique un cambio tecnológico fundamental¹⁹², nos encontraremos con estos escalones.

Sin embargo, la transición desde el contexto BAU al E3.0 requerirá seguir una trayectoria

¹⁹¹ Aunque los escenarios BAU sí que pretenden recoger al mismo tiempo una visión optimista de cómo podríamos evolucionar en contexto BAU.

¹⁹² Estos saltos finitos en el año inicial del desarrollo de los escenarios obedecen a la consideración de soluciones tecnológicas distintas en los contextos BAU y E3.0, pero realmente no introducen ninguna diferenciación conceptual respecto a las situaciones en las que el escenario E3.0 se desarrolla de forma gradual partiendo del mismo punto inicial que el escenario BAU; en ambos casos la evolución final estará sujeta a un escenario de transición para pasar de la trayectoria BAU a la E3.0. Veamos un caso concreto que ayude a centrar este planteamiento: para la movilidad por carretera de pasajeros, el contexto E3.0 recurre tanto a una electrificación de los vehículos como al incremento de los factores de capacidad con los que se usan. En el caso de la electrificación, el cambio de tecnología implica un salto finito en el instante inicial, siguiendo posteriormente la tecnología E3.0 una trayectoria de evolución hasta llegar al año 2050 final de nuestro escenario. En el caso del incremento de los factores de capacidad, su despliegue e incorporación al sistema se puede anticipar como más gradual, de tal forma que los vehículos eléctricos introducidos al inicio del escenario se usarán con el mismo factor de capacidad que los vehículos de combustible fósil del contexto BAU. El efecto final debido a la evolución de estos dos factores definirá una trayectoria E3.0 a la que deberemos evolucionar desde una trayectoria BAU, para lo cual podremos seguir distintos escenarios de transición. Sin embargo, para diferenciar estas dos situaciones, los escenarios E3.0 que parten del mismo punto inicial que el contexto BAU los designaremos como E3.0, mientras que aquellos que partan de un punto inicial distinto los designaremos como tecnología-E3.0.

progresiva, más o menos acentuada según el ritmo de implementación de los cambios estructurales requeridos.

El objetivo de este informe es el análisis del horizonte en el año 2050, motivo por el cual el proceso de transición en principio no afecta a los análisis realizados. Sin embargo, puesto que nos parece interesante resaltar algunos aspectos asociados al proceso de transición, hemos querido cuantificar algunas de las posibles trayectorias de transición.

Partiendo de un estado inicial (contexto BAU) y de un punto final en el año 2050 para el contexto E3.0, existe una infinidad de trayectorias que podemos seguir en el proceso de transición, dependiendo de la intensidad con la que consigamos articular los procesos de cambio. A lo largo de este informe hemos querido retener tres de estas posibles trayectorias:

- Escenario de transición retardado: describe un escenario en el que retardamos el proceso de transición hacia la tecnología E3.0.

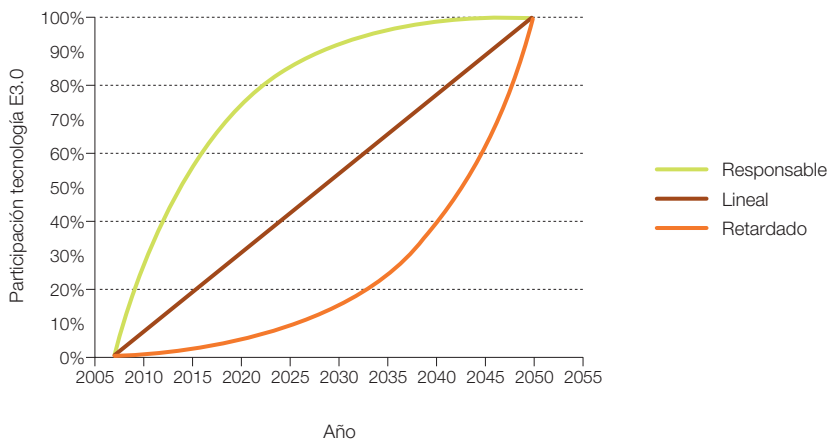
- Escenario de transición lineal: describe un escenario en el que el proceso de incorporación de la tecnología E3.0 es lineal en el tiempo.

- Escenario de transición responsable: describe un escenario en el que aceleramos la incorporación de la tecnología E3.0 en los primeros años del escenario para dar respuesta a los requerimientos del sistema climático.

En la figura 50 mostramos la evolución de la participación de la tecnología E3.0 en cada uno de estos escenarios de transición.

En estas condiciones, al darse un escenario BAU tendencial, y una evolución a lo largo del tiempo de las prestaciones potenciales que nos proporcionaría la tecnología E3.0 para cada uno de los sectores o subsectores energéticos, asociado a cada uno de los escenarios de transición tendremos una evolución a lo largo del periodo de tiempo considerado del consumo energético. La figura 51 nos

Figura 50. Evolución de la participación de la tecnología E3.0 para los tres escenarios de transición considerados.



ilustra esta situación para un caso hipotético y un escenario de transición retardado.

Como podemos observar, dadas las tendencias BAU y de tecnología E3.0 a lo largo del periodo de tiempo considerado, es muy fácil que un escenario de transición E3.0 nos conduzca a un pico de la demanda de energía en el interior del periodo considerado. Estos picos traen como consecuencia una necesidad de sobredimensionar las estructuras energéticas, probablemente con tecnologías BAU, por lo que pueden hipotecar la capacidad de alcanzar el punto final deseado en el año 2050 como consecuencia de las resistencias a la transición que surgirán si las inversiones correspondientes a estas infraestructuras energéticas no se pueden amortizar¹⁹³.

Otra característica que ilustra esta figura sobre los escenarios de transición retardados es el hecho de que siempre requieren desplegar unas elevadas tasas de cambio durante periodos de tiempo prologados como resultado de haberse mantenido más tiempo cerca de

la trayectoria BAU. Estas elevadas tasas de cambio, se traducen inevitablemente en mayores costes del proceso de transición.

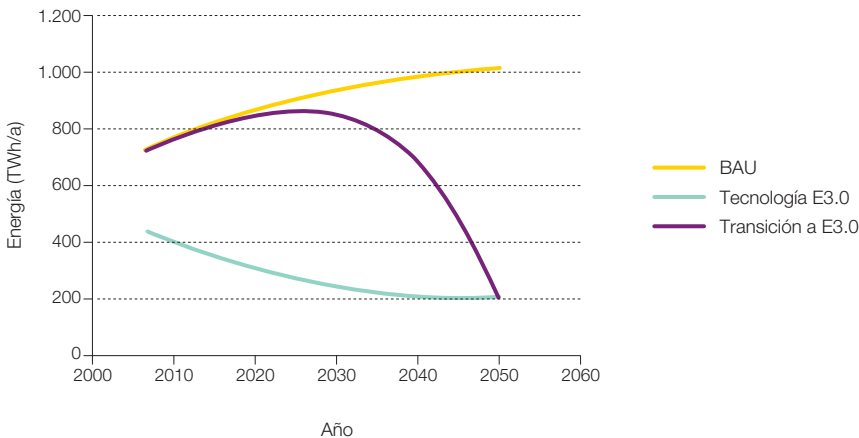
3.2 Evolución histórica

Uno de los puntos importantes para la elaboración de escenarios es la evolución histórica de las variables relevantes. Una “monitorización” deficiente de dichas variables a lo largo del tiempo introduce muchas limitaciones tanto para poder diagnosticar el estado actual del sector como para elaborar escenarios que se apoyen en las tendencias pasadas.

En España, por lo general, la “monitorización” de las variables relevantes para elaborar escenarios energéticos es muy deficiente. Los datos se encuentran desperdigados en muchos foros de alcance parcial, y presentan serias deficiencias e incongruencias entre ellos.

Por otro lado resulta interesante recalcar la parcialidad con la que a menudo se recopilan

Figura 51. Ejemplo de la relación entre los distintos escenarios. En este caso, el escenario de transición de BAU a tecnología E3.0 es el retardado.



193 Esta es la situación que estamos viviendo en la actualidad con el boicoteo del sector de los ciclos combinados al desarrollo de las energías renovables, ocasionado por el hecho de que el ritmo de crecimiento de las energías renovables reduce el factor de capacidad de las centrales de ciclo combinado (ahorran combustible fósil), y por tanto no permite amortizar las instalaciones de ciclos combinados impulsadas fuera de tiempo como consecuencia de un serio error de planificación energética a finales de la década de 1990.

los datos relativos al consumo energético y emisiones de un país. Como ejemplo, en (MacKay JC D., 2008) encontramos una comparación de las emisiones per cápita de GEI en el Reino Unido con la contabilidad actual (11 tCO₂-eq/p-a) y lo que se obtendría si se tuvieran en cuenta las emisiones asociadas a todos los productos que se importan en el Reino Unido (21 tCO₂-eq/p-a), que conduce prácticamente a doblar el valor de las emisiones per cápita de este país. En (Santacana, M., et al., 2008) indican que para el caso de España en el año 2005 las emisiones de GEI en el año 2005 se incrementaban un 16,9% (1.68 tCO₂-eq/p-a) respecto a las emisiones interiores del país recogidas en el inventario de emisiones de GEI español para ese año, como consecuencia del balance entre importaciones y exportaciones, hasta situarse en 11.68 tCO₂-eq/cap.

3.3 Clima

Uno de los objetivos¹⁹⁴ de potenciar la transición desde un contexto BAU a uno E3.0 es evitar un cambio climático de origen antropogénico que vaya más allá de lo que podemos considerar seguro para el conjunto de habitantes y ecosistemas de este planeta.

Sin embargo, la situación en la que nos encontramos actualmente no es en absoluto neutra respecto a la posibilidad de que experimentemos un cambio climático: los puntos límites del sistema climático ya han sido superados por el forzamiento de origen antropogénico, y simplemente nos encontramos en el lapso de tiempo que nos proporciona la capacidad inercial del sistema climático para ver si somos capaces de invertir el forzamiento ya realizado, antes de que el sistema climático alcance un punto de no retorno desde el que ya resulte imposible evitar que se

desencadenen los efectos indeseados del forzamiento al que ya hemos sometido al clima. La falta de capacidad resolutoria que constatamos en nuestros políticos en las negociaciones internacionales de cambio climático, no permite concebir demasiadas esperanzas de que realmente seamos capaces de invertir el proceso en el plazo de tiempo disponible.

Si a esto le añadimos que hay efectos del cambio climático que ya se dejan sentir de forma significativa en todo el planeta y particularmente en nuestro país (Martínez Linares, J., mayo 2009), resulta dudoso que podamos asumir de cara al futuro que el clima se mantendrá igual al que conocemos hasta ahora. Esto es especialmente cierto para un contexto BAU en el que lejos de invertir el forzamiento climático de origen antropogénico, procedemos a incrementarlo todavía más. Pero incluso en el contexto E3.0, y teniendo en cuenta el carácter global de la física del sistema climático, parece difícil que podamos regresar a las condiciones climáticas actuales.

Para los análisis desarrollados en este estudio, el clima tiene un efecto significativo sobre diversos aspectos:

- La demanda energética de algunos sectores, como es el caso del de la edificación, va a verse modificada por los efectos del cambio climático. En general cabe esperar un incremento de la demanda de refrigeración y una reducción de la de calefacción, dependiendo el efecto global de la severidad climática de invierno en el emplazamiento considerado. Para España, como comentaremos posteriormente cabe esperar un incremento de la demanda total de climatización de los edificios.
- Los recursos de las tecnologías renovables, en general se verán modificados por el

¹⁹⁴ Además de evitar una situación de cambio climático con grandes impactos, hay otros objetivos asociados a la potenciación de la transición de un contexto BAU a uno E3.0. Uno de ellos es sencillamente establecer un modelo de desarrollo sostenible capaz de ser exportado al conjunto de la población del planeta. Otros objetivos están asociados a planteamientos de equidad para que las herramientas necesarias para desarrollar una sociedad estén al alcance de todos.

cambio climático. El signo de la modificación depende del recurso específico. Así, cabe esperar una reducción del recurso hídrico, pero un incremento del recurso solar.

Para elaborar los escenarios presentados en este informe, así como para analizar la operación del sistema energético basado en energías renovables hacemos un uso extensivo de años meteorológicos tipo (TMY)¹⁹⁵ en cada una de las provincias peninsulares:

- Para evaluar la demanda horaria del parque de edificios se han realizado simulaciones dinámicas de los distintos tipos de edificios sometidos a los TMY de cada provincia.
- Para evaluar la secuencia horaria de la capacidad de generación de cada una de las distintas tecnologías renovables consideradas, se han realizado simulaciones de las centrales sometidas a los TMY de cada provincia.

Por tanto, tiene interés explorar la evolución que cabe esperar de los TMY. Lo ideal sería desarrollar este estudio con dos conjuntos de TMY, uno para el contexto BAU (correspondiente a un escenario de elevadas emisiones), y otro para el contexto E3.0 con emisiones significativamente inferiores, con la dificultad añadida de que el escenario climático resultante no depende tan solo de cómo evolucionen las emisiones en España (el alcance de este estudio), sino en el conjunto del mundo.

3.3.1 Revisión de la información relativa al cambio climático

Se ha avanzado mucho en la elaboración de información relativa a la evolución del clima de acuerdo con los distintos escenarios de emisiones. A nivel planetario, los modelos

de circulación general atmósfera-océano (AOGCM) han ido evolucionando en su capacidad de predecir la evolución de las distintas variables climáticas, y se han recogido sus resultados en los sucesivos informes del IPCC. La aplicación de técnicas de regionalización sobre estos modelos globales, tanto estadísticas como dinámicas (RCM), ha proporcionado desde la publicación del tercer informe del IPCC (2001) información de mayor detalle regional para poder empezar a afinar en la magnitud del impacto del cambio climático a nivel local.

En España, en (de Castro, M.; Martín-Vide, J. and Alonso, S., 2005) encontramos unos primeros resultados de aplicación de técnicas de regionalización dinámica para España a los resultados de modelos globales desarrollados en el marco del tercer informe del IPCC, para los escenarios de emisiones del IPCC A2 y B2¹⁹⁶. En esta referencia se presentan resultados promedios a nivel estacional (invierno, primavera, otoño y verano) para el periodo 2071-2100, sobre temperaturas medias, precipitaciones, evapotranspiración y velocidad del viento. La tendencia de las temperaturas medias es generalizada al crecimiento, con incrementos mayores en verano que en invierno, y un mayor incremento en las temperaturas medias máximas que las medias mínimas, por lo que se incrementa la oscilación de temperaturas respecto al clima actual. Las temperaturas máximas (percentil 90) se incrementan de forma importante en primavera, significativamente por encima de las medias máximas diarias, lo que indica una intensificación de las condiciones extremas. Por lo que respecta a la precipitación se presentan reducciones prácticamente en todas las estaciones, excepto en invierno, donde hay un incremento en la mitad norte (especialmente hacia el oeste). Respecto a la velocidad del viento, se muestran incrementos en verano y

¹⁹⁵ El TMY (Typical Meteorological Year) es un archivo en el que se recoge la evolución de las distintas variables meteorológicas (temperatura, humedad, irradiación solar, velocidad del viento, etc.) a lo largo de un año (8.760 horas / año) que se considera representativo de las condiciones climáticas medias del emplazamiento.

¹⁹⁶ Debemos resaltar, que los escenarios de emisiones A2 y B2 conducen a concentraciones de CO₂-eq significativamente superiores a las 450 ppm, y consecuentemente a incrementos de temperatura superiores a los 2° C. En concreto, para el año 2100 (lejos de haberse estabilizado) el escenario A2 conduce a una concentración de CO₂ de unas 850 ppm y el B2 de 760 ppm. En este sentido, debemos considerar estos dos escenarios como situaciones a evitar.

reducciones en el resto de estaciones en la mayoría de la península.

Los valores presentados en esta referencia son insuficientes para modificar los TMY que empleamos para realizar las simulaciones asociadas al sistema energético por los siguientes motivos:

- Están disponibles tan solo de forma gráfica y no numérica¹⁹⁷.
- Son promedios estacionales (tres meses), lo cual no proporciona suficiente detalle para aproximar¹⁹⁸ el cambio de tendencia a lo largo del año.
- Se trata de promedios para el periodo 2070-2100, más allá del alcance de nuestro estudio.
- Están asociadas a unos escenarios de emisiones A2 y B2 que conducen a unas concentraciones globales de CO₂ muy superiores¹⁹⁹ a las que se pretende alcanzar con el contexto E3.0.
- No contienen información de variables climáticas necesarias para la simulación del sistema energético (humedades, nubosidad, iluminancia y radiación solar).

En (Abanades García J.C., et al., 2007) se presenta una recopilación de los resultados de los escenarios climáticos regionales para España, pero desde el punto de vista del modelado del efecto del cambio climático sobre los TMY a emplear en este estudio, no añade información relevante respecto a la referencia anterior. A nivel cualitativo añade información sobre la humedad relativa, y menciona que la tendencia será a la reducción, de forma más acentuada en verano, y sobre la irradiación solar, que aumentará como consecuencia de la reducción de la nubosidad,

excepto en invierno que permanecerá del orden de la actual. Respecto a la velocidad del viento menciona que prácticamente no habrá variaciones, lo cual no concuerda con los resultados de los modelos regionales de la referencia anterior.

En (Brunet M., et al., 2009) encontramos la información más reciente relativa a escenarios regionalizados de cambio climático en España. Este informe, publicado por la AEMET, constituyó una de las primeras actividades del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático aprobado en el año 2006. El objetivo de este trabajo era poner a disposición de los distintos colectivos, datos de escenarios regionales de cambio climático, para así poder avanzar en la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. En principio se trataba de poder sacar unos primeros resultados de forma rápida, para hacer accesibles al público los resultados actuales de los modelos regionales, y posteriormente elaborar más estos resultados y hacer accesible más, y más actualizada información correspondiente a los escenarios regionalizados en España. Sin embargo, parece que desde la primera publicación de resultados no se ha progresado en la línea planificada, pues el informe disponible en la web de la AEMET al redactar este informe (2/2010) sigue conteniendo tan solo la información correspondiente a los resultados inicialmente presentados.

Esta referencia presenta por un lado resultados más detallados de la evolución de las variables climáticas según distintos modelos globales y técnicas de regionalización²⁰⁰, sin procesar el conjunto de la información disponible en el formato de la evolución más probable según la fiabilidad de las distintas proyecciones, y al anunciar la disponibilidad de los distintos resultados con una resolución diaria²⁰¹.

197 Lo cual reduce la precisión de cara a su uso.

198 Como comentaremos más adelante, la modificación de TMY llevada a cabo de acuerdo con los modelos climáticos de regionalización en otros países como el Reino Unido, partía de los valores mensuales.

199 Si bien pueden corresponderse con la evolución BAU.

200 En concreto, la base de datos generada hace uso de cinco modelos globales, 10 modelos regionales de clima (RCM) y cuatro técnicas de regionalización empíricas, así como de dos escenarios de emisión (A2 y B2).

201 Esta resolución diaria es superior a la empleada en otras referencias que posteriormente mencionaremos para modificar los TMY de acuerdo a estos escenarios de cambio climático mediante "morphing". En concreto, para el caso del Reino Unido, se han producido TMY oficiales adaptados a distintos escenarios de cambio climático. Pero el proceso de *morphing* tiene importantes limitaciones para reproducir la secuencia horaria, y en el caso de intentar aplicarlo a nivel diario, conlleva un volumen de trabajo que no queda justificado ante la posibilidad de disponer directamente de los datos horarios procedentes de los modelos regionalizados, que en este caso debería hacer disponible la AEMET.

Los escenarios de emisiones considerados en este informe son tan solo los A2 y B2 descritos en el Informe Especial de Escenarios de Emisión (SRES) del IPCC publicado en 2000. Si bien los escenarios SRES (2000) han servido de base también para el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, pero los casos A2 y B2 son, como comentábamos anteriormente, escenarios que conducen a concentraciones de GEI e incrementos de temperatura muy superiores a los que deberíamos permitir, lo que difiere, por tanto, significativamente de lo que cabría esperar en un contexto E3.0.

Sin embargo, los resultados que se presentan en esta referencia proceden de las simulaciones con modelos globales realizadas en el marco del tercer informe del IPCC (año 2001), es decir, no incorporan las mejoras y actualizaciones correspondientes al cuarto informe del IPCC (año 2007). Sobre estos resultados se han aplicado por un lado distintas técnicas de regionalización estadística, para generar información de temperaturas y precipitaciones en distintos intervalos de tiempo, y por otro lado se han recogido resultados de aplicaciones pasadas de técnicas de regionalización dinámica basadas en ejecuciones de modelos regionales del clima (RCM) en el marco de un proyecto europeo²⁰². Estos resultados procedentes de RCM son los más detallados, por proporcionar información de otras variables climáticas²⁰³ necesarias para confeccionar un TMY más allá de las temperaturas y las precipitaciones. Sin embargo, estos resultados están disponibles tan solo para el periodo 2071-2100, además de seguir sin estar actualizados a los resultados de los modelos empleados en el cuarto informe del IPCC.

Los resultados a nivel mensual del procesado de esta base de datos disponible que se presentan en (Brunet M., et al., 2009) muestran las siguientes tendencias:

- Temperaturas: incrementos de medias, máximas y mínimas. Pero incrementos máximas mayores que mínimas, e incrementos en verano mayores que en invierno.
- Precipitación: menor consistencia de los resultados entre los distintos modelos. Pero parece apuntar a una disminución anual, con posible incremento invernal y gran disminución primavera-verano.
- Nubosidad: reducción excepto en invierno.
- Humedad relativa: disminución.
- Velocidad del viento: reducción en invierno e incremento estival.

Esta información, si bien es más detallada, sigue siendo insuficiente para adaptar los TMY a los escenarios de cambio climático.

Ya han empezado a aparecer estudios que analizan el impacto sobre distintos sectores del sistema energético de estas proyecciones de cambio climático.

En (Isaac, M.; Van Vuuren, D.P., 2009) se presenta un análisis del efecto del cambio climático sobre la demanda de energía del sector edificación residencial. A nivel global, para el año 2100 prevén que el cambio total de demanda de energía se encontrará acotado debido a que se compensarán parcialmente las reducciones de demanda de calefacción con los incrementos de demanda de refrigeración, sin embargo el impacto por separado sobre la demanda de calefacción y de refrigeración a nivel global es considerable, para reducirse la primera en un 34% e incrementarse la segunda en un 72% para el año 2100 a nivel global. A nivel local, el efecto sobre la estructura de la demanda de energía y sobre su valor absoluto puede ser significativo. Indican

202 PRUDENTE: Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects, EU 5th Framework Project.

203 En concreto parece que hay disponible información de humedades, radiación solar y velocidades del viento.

que para emplazamientos con más de 2.200 grados-día de calefacción²⁰⁴, el cambio climático tiende a reducir más la demanda de calefacción de lo que aumentará la demanda de refrigeración, y por tanto se experimentará una reducción de la demanda total de energía para esos edificios residenciales. En España, la inmensa mayoría de emplazamientos²⁰⁵ tienen menos de 2.200 grados-día de calefacción, y por tanto el efecto del cambio climático será a aumentar la demanda de energía de los edificios residenciales. Dado que en los edificios no residenciales es habitual que nos encontremos con un mayor nivel de generación interna de calor y de ganancias solares, cabe esperar que en ellos todavía sea mayor el incremento de energía total demandada por los edificios como consecuencia del cambio climático. Incluso en el Reino Unido esperan que el incremento de la demanda de refrigeración sea superior a la reducción de la demanda de calefacción.

A nivel global, el escenario desarrollado en esta referencia²⁰⁶, en el que se incluye la evolución del nivel adquisitivo y de la internalización de las demandas de climatización a lo largo del mundo, pronostica que la situación pasará de un claro predominio²⁰⁷ a nivel global de la demanda de calefacción sobre la de refrigeración, a que ambas demandas se encuentre equilibradas²⁰⁸ en torno al año 2070, a partir de cuyo momento la demanda de refrigeración que mantiene elevadas tasas de crecimiento hasta bien pasado el año 2100 se establece como la demanda energética dominante²⁰⁹ para climatizar los edificios residenciales.

En (Jentsch, M.F. et al., 2008) presentan resultados asociados a la generación de TMY post-cambio climático oficiales para el Reino Unido a partir de la regionalización de los resultados proporcionados por los modelos globales de cambio climático. El procedimiento seguido es

un *morphing* de los TMY actuales empleando valores mensuales de previsión de cambio climático bajo cuatro escenarios de emisiones, produciendo y poniendo a disposición de los usuarios la información en dos formatos típicos²¹⁰ de archivos climáticos para simulaciones de edificios y de sistemas energéticos. Una conclusión interesante es que los procedimientos de *morphing* reproducen las secuencias del clima actual, por lo que no recogen los episodios extremos ni modificaciones del ciclo diario. A nivel de curiosidad, en el marco del estudio comentado por esta referencia se procedió a monitorizar un edificio, y coincidió con la existencia de una ola de calor en el Reino Unido durante el verano de 2006, de tal forma que las condiciones experimentadas por el edificio fueron peores a las que proporcionaba el TMY²¹¹ post cambio climático para el año 2050. La conclusión es que lo interesante sería poder disponer directamente de las secuencias horarias de evolución de las variables climáticas que salen de los modelos regionales de cambio climático, en lugar de manipular los TMY del clima actual con unos escasos indicadores producidos por los modelos de cambio climático.

3.3.2 Planteamiento adoptado en relación al cambio climático

Podemos concluir de lo anteriormente expuesto que cabe esperar una modificación significativa del clima en España como consecuencia de los efectos del cambio climático: incremento de temperaturas, incremento de oscilación de temperaturas (temperaturas máximas subirán más que mínimas), incremento de radiación solar, reducción de humedad relativa, reducción de precipitaciones, modificación de regímenes de vientos. Es decir, los TMY que representen la condición climática en la situación postcambio climático serán distintos a los actuales.

204 En esta referencia emplean una temperatura base de 18° C para definir los grados día.

205 A nivel de capitales de provincia, los valores proporcionados por la norma UNE 24 046 indican un valor máximo de los grados-día de calefacción en base 15° C de 2143° C-día/a en León, y un mínimo de 208° C-día/a en Almería, pasando por valores de 656° C-día/a en Barcelona y de 1405° C-día/a en Madrid. El límite que indican en la referencia son 2.200° C-día/a en base 18° C, que en base 15° C sería algo inferior.

206 Este escenario de evolución de la demanda de energía del sector residencial está asociado a un escenario de emisiones que conduce a un incremento de temperatura de 3,7° C para el año 2100.

207 Predominio asociado a que los países que actualmente tienen mayor poder adquisitivo y que por tanto han internalizado más la demanda de confort, se encuentran en latitudes elevadas en las que con el clima local claramente domina la demanda de calefacción frente a la de refrigeración.

208 La demanda de calefacción experimenta un ligero crecimiento hasta el año 2030 en que los efectos del cambio de clima empiezan a dominar sobre el remanente a internalizar de esta demanda, para posteriormente experimentar un ligero decrecimiento continuo. Por otro lado, la demanda de refrigeración a nivel global empieza a experimentar un rápido crecimiento a partir del año 2011 debido al incremento del nivel económico en los países de latitudes medias donde incluso con el clima actual domina la demanda de refrigeración sobre la de calefacción.

209 En el año 2100 la demanda de refrigeración del sector residencial a nivel global llega a ser bajo este escenario un 55% superior a la de calefacción (la diferencia sigue aumentando en el S.XXII), y las emisiones de CO₂ asociadas a la demanda de refrigeración de un 155% superiores a las de calefacción (en este escenario BAU se pronostica una escasa introducción de renovables en el sistema eléctrico, por lo que la demanda de refrigeración, al cubrirse vía eléctrica, resulta más intensiva en carbono que la de calefacción).

210 Concretamente TMY2 y EPW.

211 Realmente no era un TMY sino un DMY de verano (año de diseño para condiciones de verano, es decir, incluso más extremo que el TMY).

Por tanto, parecería adecuado emplear unos TMY postcambio climático para desarrollar los análisis asociados a este estudio, en particular para generar la secuencia horaria de demanda energética del sector edificación, y para generar las secuencias de capacidad de generación eléctrica de las distintas tecnologías renovables.

Sin embargo, para emplear TMY postcambio climático nos encontramos con una serie de dificultades:

- Tomar una decisión sobre el escenario de emisiones que se va a desarrollar. La modificación del TMY es muy distinta según en qué escenario de emisiones nos coloquemos. Puesto que el objeto de potenciar la transición al contexto E3.0 es precisamente evitar los escenarios de elevadas emisiones, un planteamiento coherente con la adopción del contexto E3.0 en el conjunto del planeta como la que aquí defendemos nos debería decantar hacia un escenario de bajas emisiones y por tanto pequeña modificación climática.
- La información climática disponible en los escenarios climáticos regionalizados para España es actualmente insuficiente para poder generar TMY representativos de las nuevas condiciones climáticas. Por otro lado, esta información corresponde a escenarios de emisiones del IPCC (A2 y B2) que conducen a estabilizaciones de la concentración de CO₂ muy superiores a los 450 ppm, e incrementos de temperatura muy por encima de los 2° C, de tal forma que estos son escenarios a evitar²¹². Además, esta información está asociada a los resultados del tercer informe del IPCC (2001), y está por tanto anticuada respecto a los resultados del cuarto informe del IPCC (2007).

- Las metodologías para generar TMY postcambio climático que parten de los TMY actuales y de la información de los escenarios regionales de cambio climático²¹³ son incompletas y limitadas, por lo que el TMY al que se llega no tiene por qué ser completamente representativo de las condiciones postcambio climático.

- En España²¹⁴ no existen TMY oficiales correspondientes a distintos escenarios de cambio climático.

- En el contexto actual recogido por los distintos escenarios de “cambio climático”, con una variación continua de las variables climáticas en tiempos característicos muy inferiores a los que anteriormente a la interferencia antropogénica seguía la evolución del clima, el propio concepto de TMY ya no tiene validez, pues al no encontrarse estabilizado el sistema climático, el cambio es continuo. En cualquier caso se podría definir TMY_i asociado a cada año y que recoja la línea tendencial media de las previsiones previstas.

A estas dificultades debemos añadir la siguiente consideración:

Un TMY es un año meteorológico que representa las condiciones climáticas promedio del emplazamiento, pero que no se corresponde ni representa a ningún año concreto. Los años meteorológicos que experimentará cualquier sistema (edificio, centrales de generación, etc.) oscilarán alrededor del TMY a lo largo de toda su vida útil.

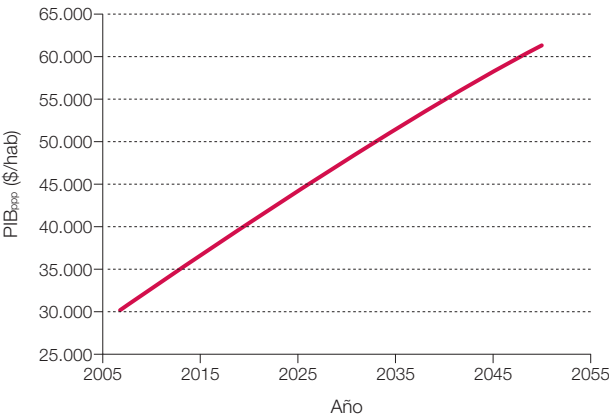
En este sentido, el sistema energético en su conjunto debe tener capacidad de responder a distintos años meteorológicos de forma satisfactoria, de tal forma que el análisis con un TMY u otro no dejan de ser más que un caso particular de los distintos años meteorológicos

²¹² Realmente sería necesario emplear dos grupos de TMY, uno para el contexto BAU (que estaría más en línea con los escenarios A2 o B2), y otro para el contexto E3.0.

²¹³ Incluso en el caso de que la información requerida estuviera disponible, que no es el caso en España.

²¹⁴ En otros países como el Reino Unido sí que existen estos TMY oficiales asociados a distintos escenarios de cambio climático. Es importante que esta información se elabore en España, pues así tendríamos de referencias oficiales a la hora de acometer el análisis del efecto del cambio climático sobre diversos aspectos (disponibilidad de recursos, demanda energética de los edificios, etc.), de tal forma que los distintos análisis realizados podrían compararse entre ellos al tomar como partida un mismo TMY. Desafortunadamente, la situación en España se encuentra muy atrasada en este sentido: los únicos TMY oficiales que hay disponibles son los empleados para la certificación energética de edificios, y ni tan solo son TMY obtenidos a partir de las series históricas, habiendo sido generados de forma sintética a empleando valores medios mensuales de las diversas variables.

Figura 52. Escenario adoptado de crecimiento del PIB en el horizonte temporal considerado (\$ constantes).



a los que se puede ver sometida la instalación. La flexibilidad del sistema energético para adaptarse a distintas evoluciones de la demanda y la capacidad de generación constituye un importante atributo.

Dado que en este estudio, por cuestiones de volumen de trabajo, tan solo podemos acometer el análisis con un año²¹⁵ meteorológico, sin realizar el análisis de sensibilidad correspondiente a la variación del año meteorológico, y puesto que en España solo existe un TMY oficial por provincia²¹⁶, vamos a emplear los TMY oficiales para desarrollar el análisis, considerándolos como representativos no ya de las condiciones climáticas medias postcambio climático, pero sí de un año concreto al que se pueda ver sometido el sistema energético en condiciones postcambio climático. Sin embargo, sí que reduciremos el producible hidroeléctrico en línea con los pronósticos de los modelos regionales de cambio climático para el escenario B2 del IPCC.

Sin embargo nos parece muy importante que desde el Ministerio de Medioambiente, a través de la AEMET, se proceda a actualizar la

información de los modelos climáticos regionales a los datos de los modelos globales correspondientes a la información más reciente del IPCC²¹⁷, y se proporcione información horaria de las variables meteorológicas relevantes²¹⁸ para los estudios de integración de renovables en el sistema energético, en un formato adecuado²¹⁹ para su implementación en estudios de demanda energética de los edificios y de capacidad de generación de los sistemas de tecnologías renovables. Esta información debería hacerse disponible para distintos escenarios de emisiones, y tanto para los distintos años específicos, como para promedios estadísticamente representativos de periodos de por ejemplo 30 años²²⁰. Sin duda, la disponibilidad pública de esta información sería muy importante para las tareas de planificación y elaboración de escenarios que se desarrollen a partir de ahora.

3.4 Crecimiento económico

En la figura 52 recogemos el escenario de crecimiento económico hasta el año 2050 adoptado para este estudio. Este escenario

215 Realmente un año meteorológico por provincia.
216 La aproximación correspondiente al clima actual que se ha implementado para el procedimiento de certificación energética de edificios.
217 Actualizándolo posteriormente a medida de que se vaya disponiendo de nueva información de modelos globales con un desfase menor al actual.
218 Temperaturas seca y húmeda, humedad, irradiación solar total y directa, velocidad del viento, luminosidad.
219 El formato de archivo EPW es uno de los que está adoptando en la actualidad una mayor profusión.
220 Dada la gran variedad de modelos globales y regionales que se emplean para pronosticar la evolución del clima, estaría bien que se procesara dicha información para proporcionar una única serie temporal que se considerara estadísticamente representativa del conjunto de resultados disponibles, asignando distinto peso a los resultados de cada combinación de modelos de acuerdo con su fiabilidad. La disponibilidad de esta serie temporal única para cada escenario de emisiones, producida desde la administración, permitiría que fueran directamente comparables los resultados de los distintos estudios que se desarrollen basándose en esta información.

es el correspondiente a realizar un ajuste exponencial del escenario de tasas de crecimiento económico planteado por (AIE, 2007) hasta el año 2030 y extrapolado por (EREC, Greenpeace, 2008) hasta el año 2050. Como podemos observar el escenario responde a un planteamiento BAU en el que no se observan tendencias significativas a la contracción ni estabilización del PIB en el periodo analizado, lo que permite que el PIB per cápita prácticamente se doble desde el momento actual hasta el año 2050 (la TAE hasta 2050 es de 1,68%). De hecho, la extrapolación de este escenario exponencial de tasas de crecimiento anual del PIB conduce a la evolución del PIB mostrada en la figura 53, en la que el estancamiento del PIB tiene lugar en torno al año 2300 con valores del orden de los actualmente existentes en las economías de mayor PIB del mundo.

Para una discusión más detallada sobre los escenarios del PIB y los límites del crecimiento, remitimos al lector al punto 2.1 de este informe.

3.5 Población

La población es otra variable importante para la elaboración de escenarios energéticos.

En España, el INE proporciona escenarios poblacionales que abarcan el periodo de análisis considerado en este estudio. Estos escenarios se van adaptando y se modifican de forma significativa con el paso del tiempo. A modo de ejemplo, en la figura 54 presentamos los dos escenarios poblacionales (escenario-1 y escenario-2), adaptados a la población peninsular, que proporciona actualmente (2009) el INE. En el mismo gráfico presentamos el escenario denominado “Renovables 2050”, que es el que se adoptó en el informe (García-Casals X., 2005), y que correspondía al escenario medio de los tres proporcionados por el INE en 2004, que era el que se consideraba como más probable en la referencia del INE, donde se presentaban estos escenarios. Como podemos observar, los dos escenarios actuales del INE proyectan poblaciones significativamente superiores a

Figura 53. Escenario adoptado de crecimiento del PIB, extendido más allá del límite temporal considerado en este estudio (año 2050) para apreciar su tendencia de contracción y saturación (\$ constantes).

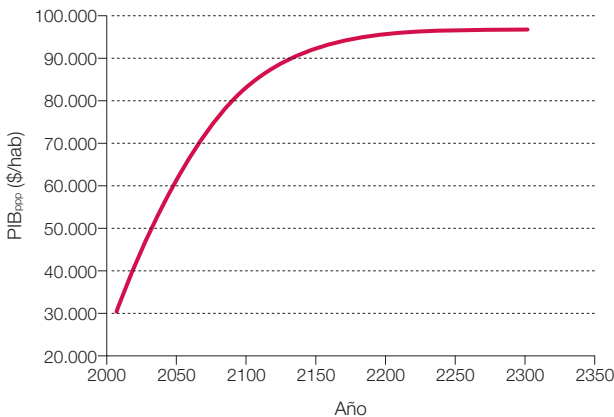
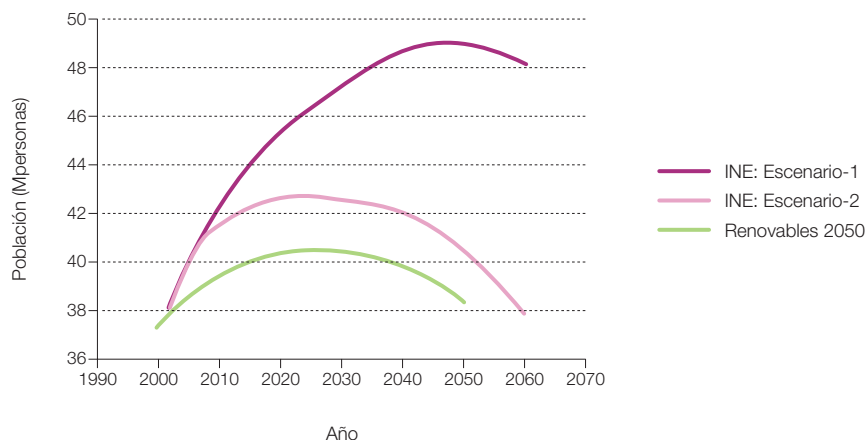


Figura 54. Comparación de distintos escenarios de población para la España peninsular. Los Escenarios-1 y Escenario-2 son los dos escenarios actualmente (2009) disponibles en la web del INE. El escenario denominado “Renovables 2050” es el escenario medio y más probable que proporcionaba el INE en el año 2004, y que fue el adoptado para (García Casals X., 2005).



las del escenario del INE de 2004, lo cual debe ser un reflejo directo de las elevadas tasas de inmigración que experimentamos en los primeros años del siglo XXI. A pesar de estas mayores tasas de crecimiento, los escenarios actuales del INE siguen pronosticando un pico en la población peninsular, que para el caso del escenario-1 se alcanza en torno al año 2049, es decir, hacia el final del periodo de análisis que nosotros consideramos, mientras que para el escenario-2 se alcanza en torno al año 2023 (del mismo orden que en el escenario Renovables 2050).

parecido al que empleamos en (García Casals X., 2005).

Sin embargo, para el desarrollo de este estudio hemos adoptado, al igual que en el caso del escenario del PIB, un posicionamiento conservador²²¹, por lo que vamos a considerar el escenario-1 del INE como el escenario poblacional en el que basaremos el desarrollo de nuestros escenarios energéticos. La población de la España peninsular para el año 2050, será, según este escenario, de 48,85 Mhab.

Es importante resaltar que en los dos últimos años (2009 y 2010), y probablemente debido a la situación de crisis económica que atravesamos, las tasas de inmigración se han reducido muy significativamente, situación que cabe esperar se extienda a los próximos años. En estas condiciones es muy probable que los escenarios actualmente previstos por el INE se corrijan a la baja durante los próximos años, y se regrese a un escenario más

3.6 Sector transporte

Recogemos en este punto los resultados del desarrollo de los escenarios BAU y E3.0 de demanda energética en el sector transporte hasta 2050.

El sector transporte tiene ya, en la actualidad, un gran peso en la demanda de energía en

²²¹ Conservador en el sentido de que una mayor población conduce a un mayor nivel de consumo energético, y por tanto requiere emplear una mayor cantidad de recursos renovables del potencial disponible.

nuestro país. En la figura 55 presentamos la estructura de la demanda del consumo de energía primaria en España según los Energy Balances de la AIE en 2007²²². En la figura 56 recogemos la evolución del consumo de energía final en el sector transporte durante los últimos años según datos Eurostat²²³.

Además, este sector presenta una fuerte dependencia de productos derivados del petróleo (del orden del 98%). Todo esto, junto a su carácter difuso y a la inercia asociada al tratamiento tradicional de este sector desde el lado de la oferta, hacen que en el contexto BAU resulte problemático implementar mecanismos con capacidad de reducir significativamente su demanda.

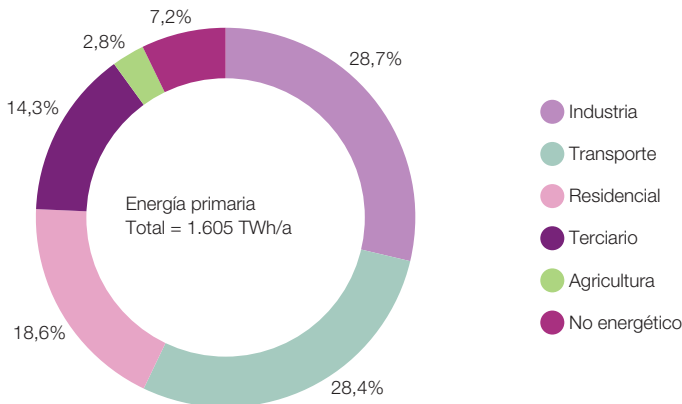
En este contexto, el escenario BAU presentado es optimista, en el que se considera que se implementan de forma activa y efectiva diversas medidas para acotar el crecimiento de la demanda energética de este sector. Sin embargo, sigue manteniendo una gran dependencia de los combustibles líquidos, y habida

cuenta de las limitaciones en disponibilidad de biomasa sostenible en nuestro país, nos sigue manteniendo con una fuerte dependencia de los combustibles fósiles y con muy poco margen para la reducción de emisiones.

Para alcanzar las evoluciones en escalón necesarias para reconducir este sector hacia la sostenibilidad en los plazos disponibles, el escenario E3.0 echa mano fundamentalmente de dos herramientas: la inteligencia mediante el despliegue de un Sistema de Transporte Inteligente (STI), y la electrificación de todos aquellos modos de transporte que lo permiten, de tal forma que el excedente de demanda a cubrir con combustibles líquidos quede suficientemente acotado como para que resulte viable acometerla mediante biocombustibles²²⁴ o mediante hidrógeno de origen renovable.

Empezaremos desarrollando los escenarios de demanda de movilidad (de viajeros²²⁵ y mercancías), para posteriormente proceder con los escenarios de reparto modal y de

Figura 55. Estructura del consumo energético en España en el año 2007. Elaborado a partir de (AIE Energy Balances 2007) pasando a términos de energía primaria los consumos eléctricos.



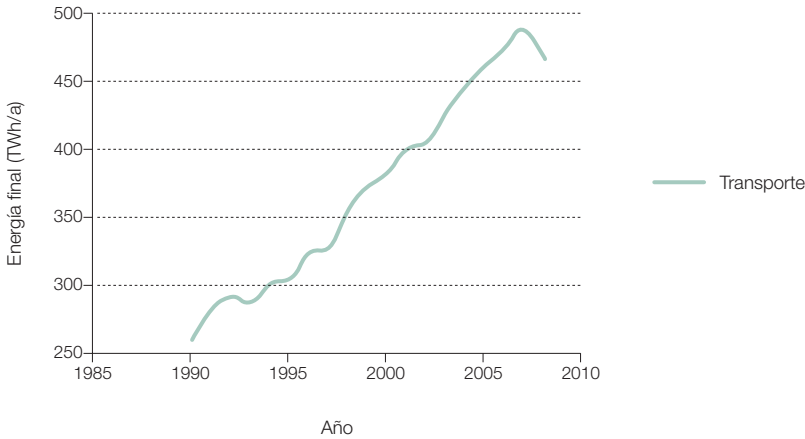
²²² Últimos datos disponibles en 10/10.

²²³ Sin embargo, el consumo real del sector transporte puede incluso ir bastante más allá de los valores recogidos en estos balances, por aspectos como el alcance de los distintos modos de transporte considerados en estos resultados, entre los que merece una mención especial la contabilización del transporte internacional. Más adelante volveremos sobre estos aspectos.

²²⁴ En este informe se consideran solo biomasa y biocombustibles derivados de biomasa obtenida de forma sostenible según los criterios de Greenpeace recogidos en Criterios de Greenpeace sobre bioenergía. 2008. <http://www.greenpeace.org/espana/reports/criterios-de-greenpeace-sobre.pdf>

²²⁵ A lo largo del informe emplearemos el término "viajeros" en lugar de "pasajeros", para referirnos a las personas que demandan el servicio de movilidad.

Figura 56. Evolución del consumo de energía final en el sector transporte para España.
Datos Eurostat.



consumo específico modal, que finalmente nos permitan generar los escenarios BAU y E3.0 de demanda energética del sector transporte.

Hemos optado por desarrollar los escenarios de demanda energética de este sector de abajo a arriba, es decir, partiendo de la demanda de servicios y deducir a partir de ella cuál es la implicación en términos de demanda de energía, por los siguientes motivos:

- Adquirir una clara conciencia del origen de esos consumos energéticos.
- Poder cuantificar los efectos de distintas opciones de eficiencia, desde los cambios modales a la introducción de nuevas tecnologías, pasando por el efecto de las medidas de inteligencia.
- Desarrollar un análisis crítico de las evaluaciones de demanda de movilidad frente a las implicaciones energéticas reconocidas de las mismas.

3.6.1 Escenarios demanda movilidad

En este punto desarrollamos escenarios de demanda de movilidad hasta 2050, tanto bajo una perspectiva BAU como bajo la perspectiva E3.0.

Las principales diferencias entre BAU y E3.0 a nivel de demanda de movilidad son debidas a la mayor desmaterialización²²⁶ y planificación²²⁷ asumidas en E3.0 respecto al BAU.

Otro aspecto importante a considerar es el tratamiento de la demanda de movilidad exterior al territorio nacional. Habitualmente esta demanda no se considera en las proyecciones del consumo energético del sector transporte.

El transporte internacional con origen o destino en España tiene relación con la actividad económica de este país, y por tanto hay tantos motivos para contabilizarlo dentro de la contabilidad energética de España, como puede haberlo para contabilizarlo dentro de la contabilidad energética del otro país origen/destino de

²²⁶ Videoconferencias, teletrabajo, e-learning, e-commerce, etc.

²²⁷ Smart logistics, accesibilidad contra movilidad, incentivación de modos no demandantes de energía (bicicleta, andar, etc.).

dicho transporte. Para afrontar este reparto de responsabilidades entre país de origen y destino, de esta demanda de movilidad, a falta de más datos y considerándolo una buena aproximación, hemos procedido a cargar a España el 50% de la demanda de movilidad internacional. Este mismo criterio es el que se ha utilizado para el reparto de las emisiones de los vuelos internacionales en la reciente normativa que incorpora la aviación al Sistema Europeo de Comercio de emisiones (ETS).

3.6.1.1 La revisión bibliográfica demanda movilidad

Antes de iniciar la presentación de los escenarios de movilidad desarrollados, vamos a presentar parte de la información bibliográfica en la que hemos basado estos escenarios, tanto a nivel de evolución histórica de la demanda de movilidad, como de otros escenarios desarrollados en la bibliografía, con el fin de fundamentar los escenarios desarrollados.

La información bibliográfica empleada era la disponible al desarrollar estos escenarios a lo largo del año 2009, y en su gran mayoría puede encontrarse referenciada en la bibliografía de este informe.

Información histórica sobre demanda de movilidad

Como dato de partida para la elaboración de los escenarios de demanda de movilidad²²⁸ hemos recopilado la información histórica disponible. Como fuentes principales de información histórica hemos empleado y procesado la información contenida en (Ministerio de Fomento, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009) y (MINECO, IDAE, 2003). En el capítulo de bibliografía pueden encontrarse otras

referencias que se han consultado para elaborar y contrastar los escenarios, entre las que cabe destacar la información disponible en Eurostat²²⁹.

A nivel general hay que resaltar la existencia de importantes carencias en la información histórica a nivel de demandas de movilidad, así como una considerable dispersión en la misma. Esto, al igual que sucede en otros sectores energéticos, es una consecuencia directa de una incompleta monitorización del sector, y constituye una importante traba para conocer su estructura, planificar medidas de ahorro y eficiencia, y realizar proyecciones futuras de su evolución y del potencial efecto de las actuaciones propuestas. En concreto, para el caso de la demanda de movilidad son notorias por su ausencia las evaluaciones de demanda de movilidad marina (viajeros y mercancías, nacional y internacional), la demanda de movilidad urbana (viajeros y mercancías), la demanda de movilidad por carretera internacional (viajeros y mercancías), y la demanda de movilidad por ferrocarril (especialmente la internacional de viajeros, pero también hay carencias en otras parcelas). De hecho, para ninguno de los modos de movilidad de viajeros y mercancías hemos conseguido recopilar información completa para la serie histórica que hemos analizado (1980-2007). De hecho, para algunos modos de transporte como es el caso del marítimo, la información histórica que se recopila²³⁰ no permite realizar una valoración de la demanda de movilidad.

Esta situación en parte también responde a la dificultad de estimar y recopilar información sobre la demanda de movilidad en un planteamiento centralizado y gobernado exclusivamente desde el lado de la oferta, como es el correspondiente al sistema de transporte actual. En este contexto, muchas de las evaluaciones de demanda de movilidad

²²⁸ La demanda de movilidad se mide en viajeros-km/año para pasajeros y toneladas-km/a para mercancías.

²²⁹ Tanto en diversos informes referenciados, como en su web (<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>). Sin embargo, hay que recalcar que los datos de movilidad recopilados en Eurostat son bastante incompletos, tanto por la ausencia de ciertos modos de transporte, como por la limitación en la dimensión de movilidad (reportar toneladas o pasajeros sin indicar a qué distancia se trasladan), como por el alcance de la movilidad recogida para algunos de ellos, que en algunos casos como la movilidad de mercancías por carretera llegan a ser tan solo del orden del 60% de los procedentes de otras referencias nacionales como el Ministerio de Fomento.

²³⁰ Típicamente toneladas transportadas (sin indicar a dónde) y entradas/salidas de buques de puertos, para el modo marítimo.

corresponden a una estimación indirecta de la misma, a menudo apoyadas en encuestas, con una cobertura parcial del origen de la demanda, que introduce una considerable incertidumbre²³¹ sobre el valor real de la movilidad cubierta por el sistema de transporte, pero que por otro lado nos permite obtener una idea del potencial de la demanda de movilidad en las condiciones actuales²³².

Por tanto, el primer paso para elaborar los escenarios es reconstruir la información histórica cubriendo sus carencias con distintas hipótesis. El objetivo de esta reconstrucción histórica es disponer de una tendencia de la demanda de movilidad para poder apoyar las proyecciones en los escenarios BAU y E3.0.

Entre las distintas hipótesis que se han realizado, muchas de ellas tienen un impacto pequeño sobre los resultados finales por tratarse de modos de movilidad con un peso modal muy bajo en el pasado y presente. Otras hipótesis, aquellas que afectan a los modos dominantes, pueden tener un mayor impacto sobre la demanda de movilidad, lo cual se añade a la incertidumbre ya existente en los datos históricos disponibles como consecuencia de los métodos indirectos y aproximados de estimación de la movilidad. Sin embargo, a pesar de todo ello, el procedimiento seguido nos permite disponer de una estructura interna²³³ de la demanda de movilidad que nos permita fundamentar la proyección de escenarios.

A continuación recogemos los principales mecanismos de reconstrucción que se han empleado:

- En ferrocarril interior, aéreo interior y aéreo exterior, se realizan interpolaciones entre los datos disponibles. En aéreo exterior incluso se extrapolan los dos años finales.

- La movilidad interior por carretera se extrapola proporcionalmente a la total marcada por MINECO (IDAE, 2003) en los primeros años sin datos.
- La movilidad exterior de mercancías por carretera en los años previos al 2003 en que empieza a haber datos, la hacemos proporcional a la interior por carretera, tomando como base el año 2003 [a pesar de que tiene un valor menor (12,5%) que los años siguientes (15%)].
- Para la movilidad por carretera exterior de viajeros suponemos un% fijo de la carretera interior. En mercancías es del orden del 12%, y en viajeros suponemos del orden del 4%.
- Para la movilidad por ferrocarril exterior de viajeros suponemos la mitad del porcentaje de mercancías exterior por ferrocarril (respecto mercancías interior).
- Respecto a movilidad urbana, disponemos de históricos de 1990-1999. Extrapolamos a ambos lados.

Un punto relevante que conviene resaltar es el ajuste realizado sobre la movilidad por carretera (tanto de mercancías como de viajeros) sobre los datos disponibles en los Anuarios del Ministerio de Fomento, que se limitan a proporcionar datos relativos a la red de carreteras a lo cargo del Estado, que en términos de movilidad de vehículos puede representar del orden del 50% del total del tráfico por la red de carreteras. Los valores obtenidos concuerdan satisfactoriamente con otros datos publicados, como (CEOE, 2009) y (Ministerio de Fomento, 2009).

También merece mención especial el tratamiento de la demanda de movilidad por modo marítimo:

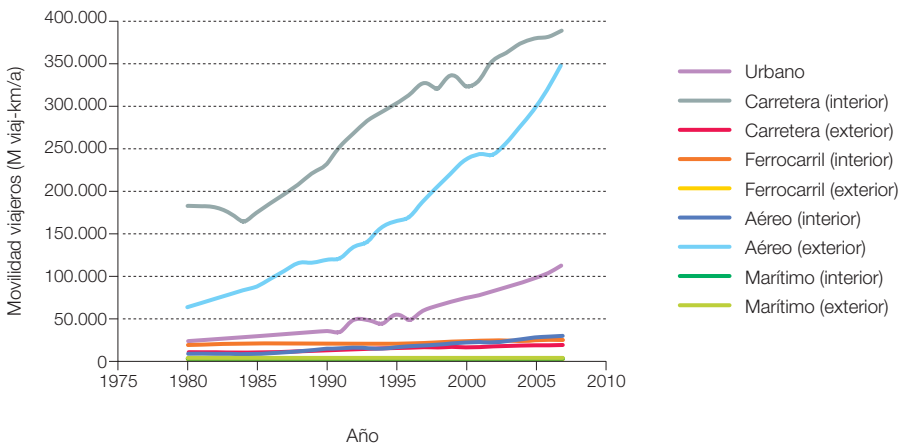
231 Hay que resaltar la incertidumbre existente sobre la demanda de movilidad de mercancías por carretera, en la que los datos del Ministerio de Fomento se evalúan según una estimación de la tasa de carga de los camiones obtenida mediante encuestas. En torno al año 1998 se incrementó este valor lo que condujo a una discontinuidad de la estimación de la demanda de movilidad, y de hecho las encuestas de los últimos años apuntan a que todavía debería ser más elevada. Sin embargo, los valores finales de demanda de movilidad que así se obtienen conducen a unas demandas de energía superiores a las que encontramos recogidas en los balances nacionales.

232 En efecto, tal y como veremos, las estimaciones de movilidad conducen a una demanda energética muy superior a la registrada en los balances nacionales, lo que indica que, o bien la demanda de movilidad realmente cubierta es inferior a la demanda de movilidad estimada, o bien que no todos los componentes de transporte están incorporados en los balances nacionales; o una mezcla entre ambos. En el primero y más probable de los casos la divergencia entre demanda cubierta y demanda estimada nos puede proporcionar una cuantificación del potencial real de la demanda de movilidad en la situación actual.

233 Mediante un proceso de calibrado posterior ya ajustaremos los resultados obtenidos a los reflejados en los balances nacionales, si bien en estos últimos también puede haber una cierta incertidumbre.

- No hay nada de información de movilidad para este modo (solo viajeros o toneladas).
- En (Greenpeace, EREC, 2008) también se excluye de los escenarios el transporte internacional de productos petrolíferos, pero se menciona que llega a ser del 9% en términos energéticos.
- Para viajeros (MINECO, IDAE, 2003) apunta a un 0,36% en 2000. Hay datos para 1990, 1995-1999, pero son muy parecidos.
 - Aplicamos estos valores a la movilidad interior por barco.
 - A partir de 2000 mantenemos el porcentaje fijo.
 - En los años sin datos usamos el 0,36%.
- Estos porcentajes se aplican sobre valores de movilidad por otros modos recopilados en anuarios del Ministerio de Fomento, que no coinciden con los totales de MINECO (IDAE, 2003).
- El marítimo exterior viajeros, según MINECO (IDAE, 2003), en términos de viajeros (no viajeros-km) es del orden de 1/3 del de cabotaje. Teniendo en cuenta distancias cuatro veces superiores, suponemos un valor de 4/3 del interno.
- En MINECO (IDAE, 2003) aparece para la movilidad interurbana de mercancías un balance modal con 11,83% para marítimo. Aplicamos esto a todos los años por falta de más datos. En (Ministerio Fomento, Ministerio Medio Ambiente, abril 2009) aparecen valores algo inferiores (10,5%), pero no indica si se refiere a toneladas o t-km (idem en viajeros).
- Para mercancías exterior, podríamos obtener los porcentajes entre los años 1990 y 2000 de los datos MINECO (IDAE, 2003), basándonos en el ratio de toneladas marinas exterior a interior y suponiendo una distancia seis veces superior. Pero esto conduce a valores exagerados de la demanda de movilidad. Por tanto, y teniendo en

Figura 57. Evolución histórica de la demanda de movilidad de viajeros según los distintos modos de transporte: todos los modos.



cuenta que en (Greenpeace, EREC, 2008) se valora que el transporte internacional de crudo llega a ser el 9% en términos energéticos, que tiene una intensidad energética intermedia, y que además de crudos hay otros productos transportados por

mar, suponemos que en total la movilidad para mercancías exterior asciende a un 15% del total de movilidad de mercancías.

Según estos planteamientos, la evolución histórica de la demanda de movilidad en

Figura 58. Evolución histórica de la demanda movilidad de viajeros excluyendo los modos dominantes (carretera interior, aéreo exterior y urbano).

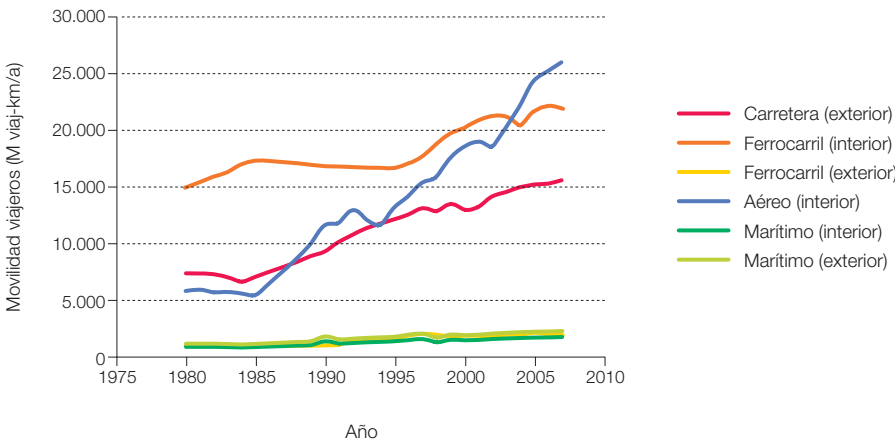
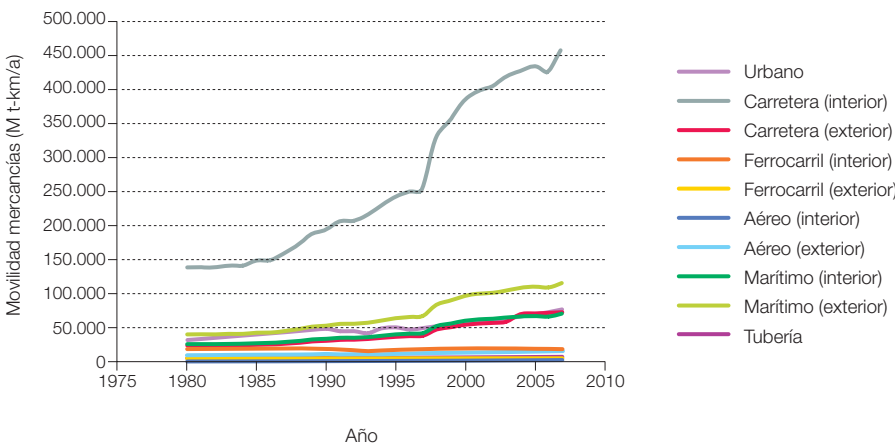


Figura 59. Evolución histórica de la demanda de movilidad de mercancías según los distintos modos de transporte: Todos los modos.



España queda tal y como se muestra en las figuras 57 a 60.

Agrupando la evolución histórica del total de movilidad de viajeros y mercancías, y reteniendo para la contabilidad energética de

España el 50% de la demanda de movilidad internacional, obtenemos para la evolución histórica de las demandas de movilidad total de viajeros y mercancías el resultado presentado en la figura 61.

Figura 60. Evolución histórica de demanda de movilidad de mercancías excluyendo el modo dominante (carretera interior).

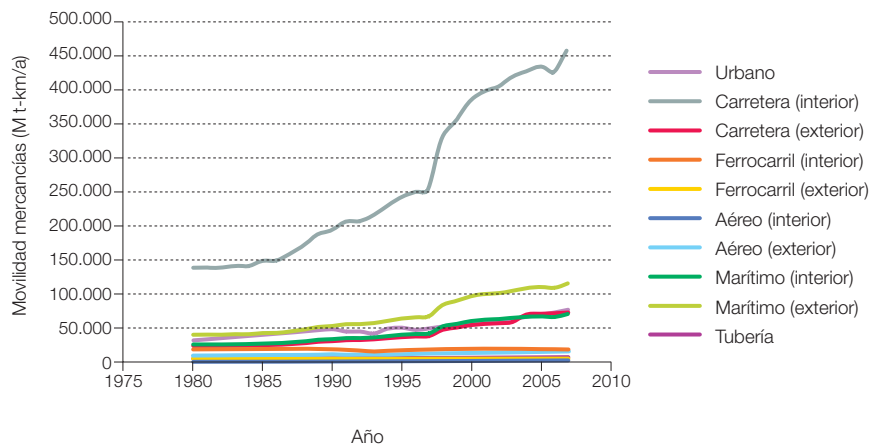
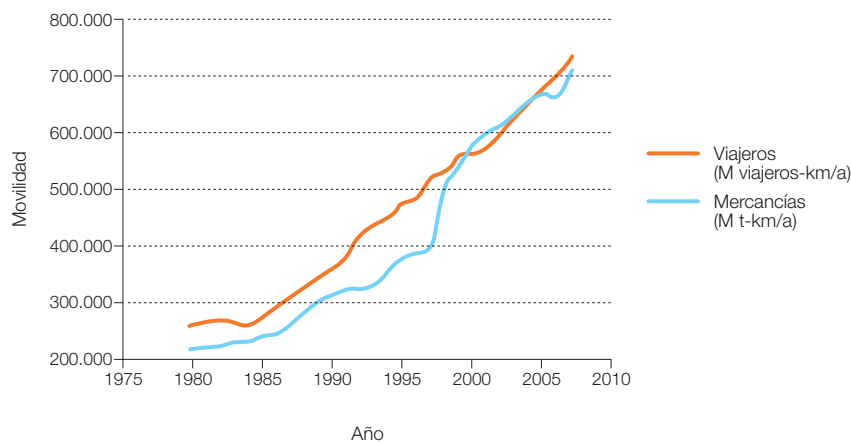


Figura 61. Evolución histórica de la demanda de movilidad absoluta del total de viajeros y mercancías.



Respecto al histórico de mercancías, resulta sorprendente el gran incremento en demanda experimentado en 1998, que se aleja de la tendencia de los años anteriores. Esta discontinuidad es debida fundamentalmente a un gran incremento del modo carretera, que aparece reflejado en los Anuarios Estadísticos del Ministerio de Fomento, y su origen se encuentra en una revisión de tasas de carga de camiones llevada a cabo en 1998. De hecho en los últimos años (2006-2007), los Anuarios Estadísticos del Ministerio de Fomento apuntan incluso evidencias de que la tasa de carga real de los camiones podría ser superior al valor empleado para estimar la movilidad de mercancías, por lo que la movilidad histórica real de mercancías podría ser incluso más elevada que la reflejada en la figura anterior.

Los valores de demanda de movilidad reflejados en estos resultados del procesado de datos históricos difieren significativamente de algunos de los resultados que se encuentran en la literatura, en cambio se ajustan muy bien a otros resultados. Merece la pena comentar algunos casos:

- Para empezar, los resultados presentados incorporan un 50% de la movilidad exterior, motivo por el que para realizar una comparación con la mayoría de los datos presentados en la bibliografía es preciso extraer esta cantidad.
- Por lo que respecta a los datos de movilidad disponibles en Eurostat:
 - La movilidad interior de viajeros de Eurostat es del orden de un 80% de la recogida en el gráfico anterior. El motivo es que en los datos Eurostat no se incorporan algunos modos como son el aéreo y el marítimo.
 - La movilidad de mercancías registrada en Eurostat es muy inferior a la recogida en el

gráfico anterior. Los motivos son, por un lado, la ausencia de algunos modos de transporte en los datos Eurostat (marítimo y aéreo), y por otro lado que la movilidad de mercancías por carretera en Eurostat es del orden del 57% de la que nosotros hemos considerado. El motivo creemos que puede estar en el origen estadístico de los datos, pues tal y como hemos indicado anteriormente en los Anuarios del Ministerio de Fomento, el dato que aparece recogido es para la red de carreteras del estado, que maneja del orden del 50% del tráfico de vehículos²³⁴. De todos modos, el valor que nosotros hemos obtenido postprocesando la información de partida, concuerda bien con el presentado en otras referencias posteriores (Ministerio de Fomento, 2009).

- Por lo que respecta a la comparativa con los valores empleados en (MINECO, IDAE, 2003):
 - En términos de movilidad de viajeros la concordancia para el año 2006 es buena, sin embargo, en los valores históricos anteriores (año 2000) los valores reflejados en (MINECO, IDAE, 2003) son sensiblemente inferiores. Esta situación conduce a que las tasas de crecimiento empleadas para la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 (E4) sean sensiblemente superiores a las que encontramos reflejadas en otras referencias.
 - Por lo que se refiere a la movilidad de mercancías, los valores recogidos en (MINECO, IDAE, 2003) son sensiblemente inferiores, y reflejan unas tasas de crecimiento histórico superiores. A este respecto resulta ilustrativo que la movilidad total de mercancías en el año 2000 empleada para el escenario de referencia de

²³⁴ En estas condiciones, y dado que el origen de los datos de Eurostat son los que le proporciona el Ministerio de Fomento, ya que en términos de movilidad de mercancías por carretera el dato que aparece reflejado en la publicación oficial (anuario) corresponde tan solo a la red de carreteras del Estado, consideramos que es muy probable que Eurostat haya recibido tan solo este dato y lo haya asimilado al de movilidad total de mercancías por carreteras.

la E4 (MINECO, IDAE, 2003) sea inferior a la histórica interurbana reflejada en esta referencia, a lo que habría que añadir del orden de un 15% más de movilidad de mercancías urbana recogida en esta misma referencia.

De cara a confeccionar los escenarios proyectando la evolución de los valores históricos, en lugar de la demanda absoluta de movilidad presentada en la figura anterior, resulta más apropiada como indicador la demanda de movilidad específica por habitante. Empleando la evolución de la población en estos años, obtenemos el histórico de demanda de movilidad específica mostrado en la figura 62.

Escenario de demanda de movilidad en la bibliografía

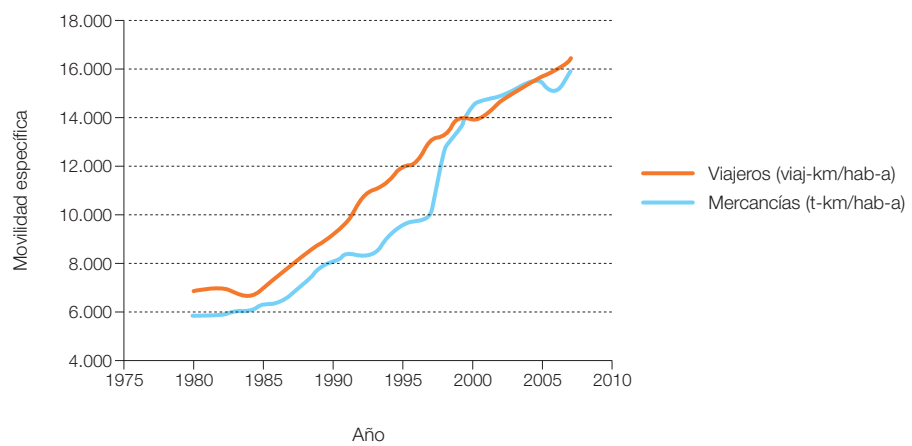
En la bibliografía referida al final de este informe se encuentran distintos escenarios de movilidad, algunos de ellos con el mismo horizonte

temporal de los escenarios que nosotros vamos a elaborar (2050). En la elaboración de nuestros escenarios hemos contrastado aspectos como las tasas de crecimiento implementadas en otros escenarios para enmarcar las hipótesis realizadas.

En la figura 63 recogemos las tasas anuales equivalentes (TAE²³⁵) de algunos de estos escenarios²³⁶, elaborados en términos de movilidad absoluta. Los valores no son directamente comparables porque los horizontes temporales son muy distintos, pero sí que apuntan a tasas de crecimiento decrecientes a medida que se prolonga el horizonte temporal (estabilización asintótica de la demanda de movilidad). Destacan en estas figuras, los valores tan elevados de las tasas de crecimiento empleadas para la E4 (MINECO, IDAE, 2003).

Los escenarios presentados en la figura anterior, referidos a movilidad absoluta, a menudo no detallan la evolución poblacional asociada. Si cruzamos estos escenarios con

Figura 62. Evolución histórica de la demanda de movilidad específica total de viajeros y mercancías.



235 TAE: Tasa de crecimiento anual que mantenida constante a lo largo del periodo considerado conduce al mismo crecimiento total.

236 Todos ellos referidos al ámbito de OCDE-Europa, UE-15 o España.

el escenario de población que hemos seleccionado nosotros²³⁷ para convertirlos en escenarios de población específica, y adicionalmente le añadimos otros escenarios en términos de movilidad específica que se encuentran en la bibliografía, obtenemos el resultado presentado en la figura 64. Una vez más podemos observar cómo, a pesar de la

Figura 63. Recopilación de tasas anuales equivalentes (TAE) de distintos escenarios de demanda de movilidad absoluta de viajeros.

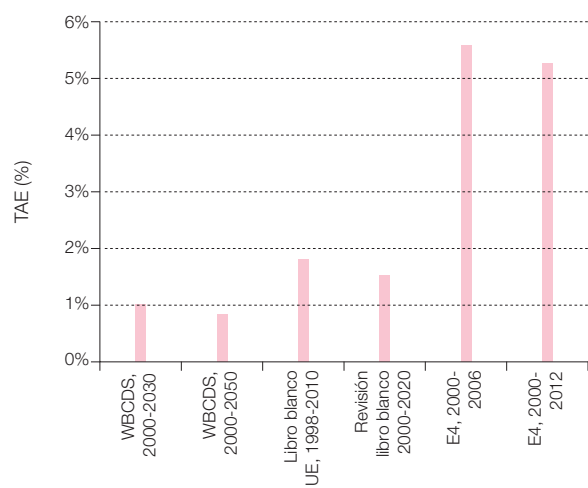
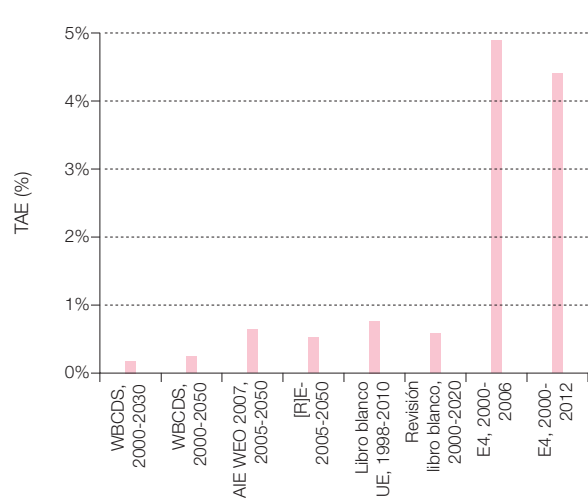


Figura 64. Recopilación de tasas anuales equivalentes (TAE) de distintos escenarios de demanda de movilidad específica de viajeros.



237 Lo cual puede presentar un margen de error significativo, puesto que los escenarios poblacionales empleados en estas referencias, en caso de haber sido tenidos en consideración para elaborar el escenario de demanda de movilidad absoluta, muy probablemente presentan un escenario poblacional inferior al que nosotros estamos empleando.

falta de homogeneidad entre los distintos escenarios, hay una clara tendencia a plantear tasas de crecimiento decrecientes con el tiempo, lo que conduce a la estabilización

de la demanda de movilidad más allá del año 2050. Por lo que respecta a la movilidad de mercancías, en las figuras 65 y 66 recogemos las TAE correspondientes a distintas

Figura 65. Recopilación de TAE de distintos escenarios de demanda de movilidad absoluta de mercancías.

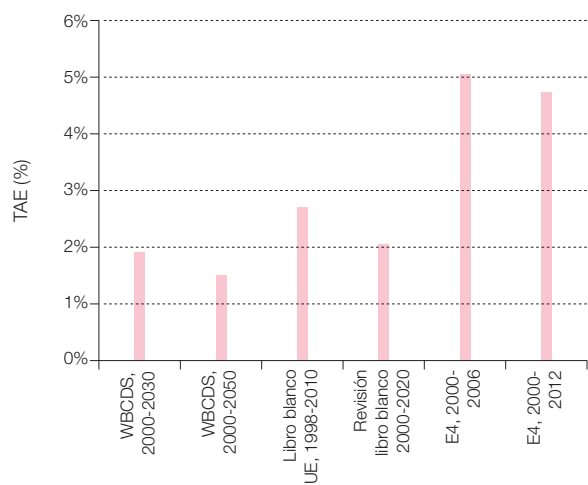
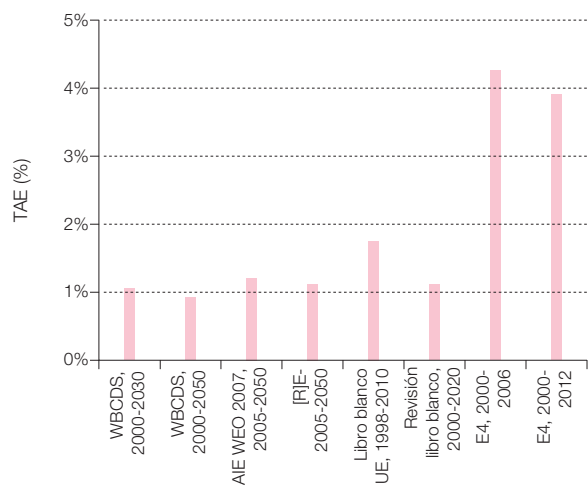


Figura 66. Recopilación de TAE de distintos escenarios de demanda de movilidad específica de mercancías.



referencias, en términos absolutos y relativos, con el mismo planteamiento que para el caso de la movilidad de viajeros anteriormente presentado.

3.6.1.2 Desarrollo escenarios demanda movilidad

En este punto desarrollamos los escenarios de la demanda de movilidad para los contextos BAU y E3.0.

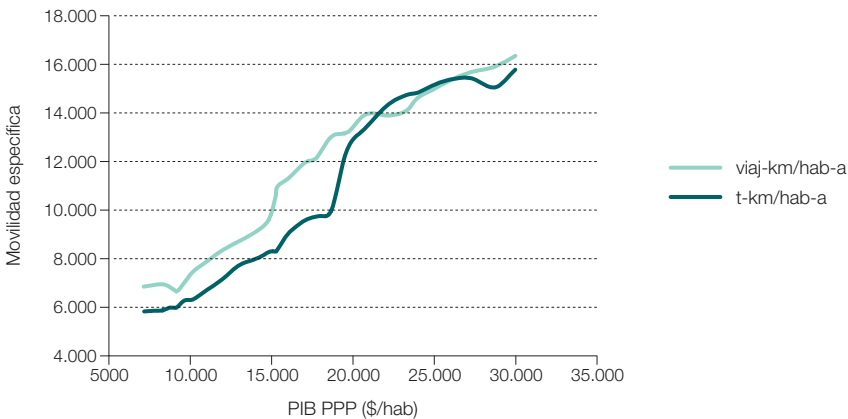
Correlación de la demanda de movilidad con el PIB

El PIB es una variable que a menudo se suele emplear para confeccionar escenarios desde una perspectiva macro. Si tomamos como referencia el escenario de PIB que presentamos anteriormente, es posible obtener una primera estimación de la proyección de las demandas de movilidad BAU. En este punto exploramos estos aspectos.

En primera instancia procedemos a analizar la correlación histórica del PIB con la demanda de movilidad en España. Empleando el PIB PPP²³⁸, tal y como nos muestra la figura 67, se obtiene una buena correlación con la movilidad específica.

Estos resultados históricos ya nos muestran un cierto desacoplamiento entre el crecimiento de la demanda de transporte, y el crecimiento económico por la tendencia de pendiente decreciente en los gráficos anteriores. En el caso de la movilidad de viajeros esto concuerda con la información disponible a nivel de UE según (EEA, transport at a cross road), pero para mercancías no concuerda. Esto a su vez puede insinuar que el crecimiento de la demanda de movilidad por carretera haya sido realmente superior²³⁹ al histórico que nosotros hemos empleado (Anuarios Estadísticos Ministerio Fomento), lo cual también se insinúa en los Anuarios del Ministerio de Fomento al indicar que las tasas de carga en camiones pueden ser superiores a lo asumido para estimar la movilidad de mercancías²⁴⁰.

Figura 67. Correlación entre la demanda de movilidad específica y del PIB PPP.



²³⁸ Purchasing Power Parity.
²³⁹ Sin embargo veremos más adelante que estas demandas de movilidad en el año 2007 ya conducen a un consumo energético superior al de los balances nacionales, por lo que mayores valores de la demanda de movilidad aumentan la divergencia con los resultados a nivel energético.
²⁴⁰ Cita del Anuario de 2007 (pág. 216): La cifra empleada como carga media de los camiones es la obtenida en la Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías del año 2007 (10.62 t). Según un estudio de Básculas Dinámicas realizado por la D.G.C. y el CEDEX esta carga podría ascender a 12,96 T.

Escenarios de demanda de movilidad de viajeros y mercancías

Del análisis del punto anterior, sacamos las siguientes conclusiones de cara a la elaboración de los escenarios BAU de demanda de movilidad:

- Para la demanda de movilidad de viajeros elegimos como escenario BAU el correspondiente para emplear un ajuste logarítmico de la dependencia histórica de movilidad con PIB PPP sobre el escenario de evolución del PIB PPP anteriormente presentado. Esta dependencia logarítmica se ajusta bien a las tendencias actuales en la EU, donde ya se observa un desacoplamiento entre crecimiento PIB y la demanda movilidad.
- Para la demanda de movilidad de mercancías elegimos como escenario BAU un ajuste potencial de la dependencia histórica de movilidad con PIB PPP sobre el escenario de evolución del PIB PPP anteriormente presentado, por el menor desacoplamiento

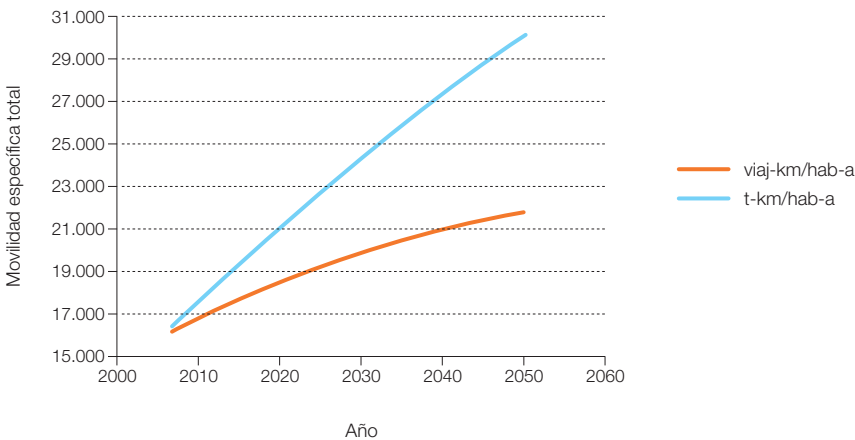
que cabe esperar en el caso de la movilidad de mercancías con el PIB PPP.

Los escenarios resultantes de demanda de movilidad BAU son los que presentamos en la figura 68.

Como podemos observar, los escenarios de movilidad resultantes presentan tasas crecientes en todo el período temporal considerado, sin mostrar tendencias significativas de saturación (especialmente el de mercancías), por lo que a partir del año 2050 seguirían creciendo de forma significativa.

Es preciso recordar aquí que el escenario BAU de crecimiento del PIB que hemos empleado para elaborar los escenarios de demandas de movilidad tiene tasas de crecimiento muy elevadas a la vista de necesidades de contracción y convergencia: el nivel de saturación al que conduce es de 100.000 \$/hab., casi el doble del valor de la economía actual de mayor PIB (Luxemburgo con 60.000 \$/hab.), cuyo valor alcanzamos en 2050.

Figura 68. Escenarios BAU de movilidad específica de viajeros y mercancías.



A modo de referencia, en las figuras 69 y 70 mostramos la evolución de la TAE de nuestros escenarios (el BAU y el E3.0 que posteriormente presentaremos), comparadas con las de otros escenarios referenciados en la bibliografía de este estudio. Como podemos observar, exceptuando los valores

del escenario de la E4²⁴¹, las tasas de crecimiento asumidas en los escenarios de demanda de movilidad aquí desarrollados se encuentran bastante en línea con los de las otras referencias. Esto es especialmente cierto para el escenario E3.0, siendo el escenario BAU más conservador.

Figura 69. Evolución de la TAE de crecimiento del escenario de demanda de movilidad de viajeros comparada con las resultantes de otros escenarios de la bibliografía.

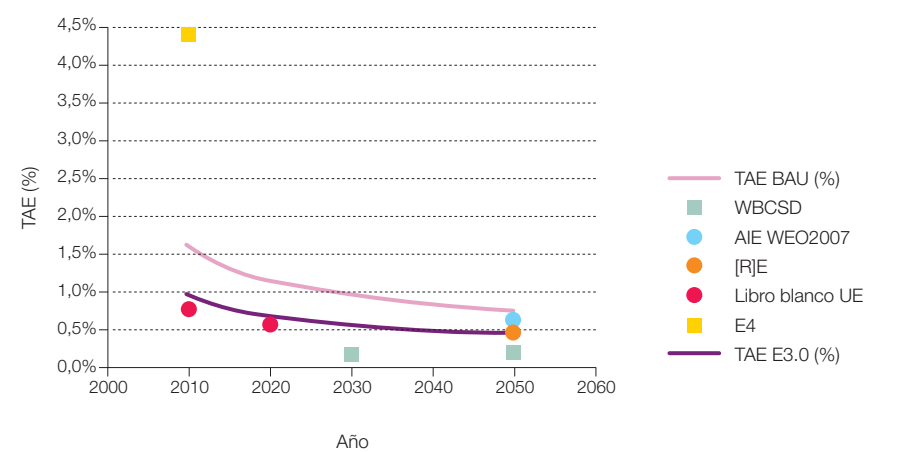
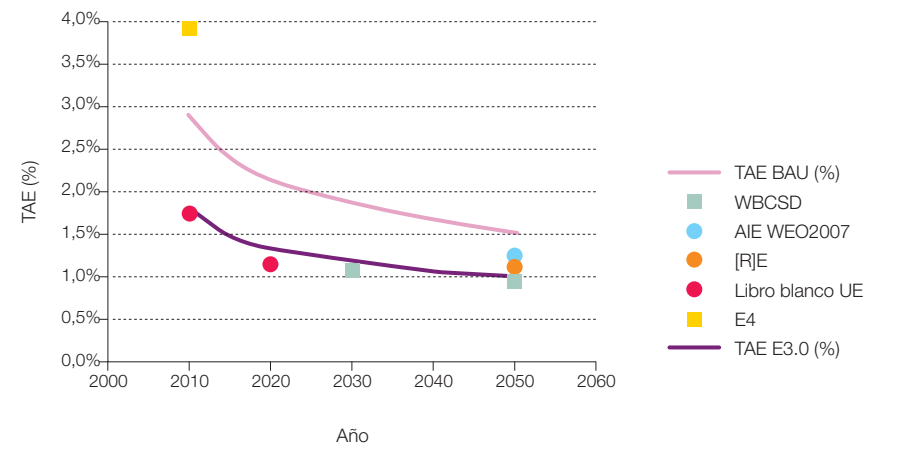


Figura 70. Evolución de la TAE de crecimiento del escenario de demanda de movilidad de mercancías comparada con las resultantes de otros escenarios de la bibliografía



241 Que como en otros aspectos casi se sale del gráfico.

Una vez elaborado el escenario BAU de demanda de movilidad, pasamos a elaborar el escenario E3.0 de movilidad tomando como punto de partida el escenario BAU.

Existen argumentos para considerar que en un escenario de eficiencia la demanda de movilidad puede verse significativamente reducida respecto a la demanda BAU. Veamos algunos de ellos:

- Desmaterialización²⁴² de la economía:
- Videoconferencias: el 30% del transporte de viajeros por avión y tren es debido a viajes de negocios, y un 30% de éstos se pueden eliminar con videoconferencias (The Climate Group, 2008). En estas condiciones cabe esperar una reducción del 9% del transporte de viajeros por avión y tren, que constituyen el 43,5% de la movilidad total en 2007, lo que implica una reducción del 3,9% de la movilidad total de viajeros.
- Teletrabajo: la movilidad de coches por motivos laborales decrece un 80% como consecuencia del teletrabajo, y por el contrario cabe esperar que dicha movilidad crezca un 20% por motivos no laborales. Vamos a suponer que esta modificación de la movilidad afecta a un 10% de los coches existentes, a un 20% de la población y a un 30-40% de la población activa (The Climate Group, 2008). Por tanto cabe esperar que por este motivo se pueda acceder a una reducción del 6% de la demanda de movilidad con coches, lo cual viene a significar una reducción del 3,2% de la movilidad total viajeros, valor que se incrementa a una reducción del 3,6% si extrapolamos estos porcentajes sobre la demanda de movilidad en coches a la demanda de movilidad con avión y tren interior.

- E-learning²⁴³: puede significar una reducción del 1,5% de la movilidad total de viajeros.
- E-commerce²⁴⁴: puede esperarse una reducción del 3% de emisiones de transporte para compras, que a su vez es el 40% del transporte no relacionado con motivos laborales, o un 20% del transporte privado total (The Climate Group, 2008). En estas condiciones cabría esperar una reducción del 0,6% del transporte en coche.
- Planificación (accesibilidad versus movilidad) y activación del mundo rural. Dentro de este concepto, entrarían:
 - Reducción en movilidad de personas por trabajo, compras, estudios, etc.: estimaremos un 2%.
 - Smart logistics²⁴⁵: reducción del 27%-17% de la movilidad total de mercancías (The Climate Group, 2008).
 - Activación de la posibilidad de mayores incrementos de los desplazamientos a pie y en bici.

En relación a la movilidad a pie y en bici, los valores actuales para España son muy bajos (EEA, 2008), especialmente para el uso de la bicicleta, que se sitúa en valores del orden de 20 viajeros-km/hab.-año²⁴⁶ para la bicicleta y de 368 viajeros-km/hab.-año para los desplazamientos a pie, que en total significan un 0,05% de la demanda de movilidad total de viajeros. De acuerdo a una mejor planificación urbanística y activación del mundo rural vamos a suponer que estos valores se incrementan en el marco del escenario E3.0 hasta alcanzar 800 viajero(S)-km/hab.-a para la bici y 450 viajero-km/hab.-a para los desplazamientos a pie, de tal forma que en total asciendan a

242 La "sociedad en red" (como extensión de sociedad de información y sociedad del conocimiento) parece el complemento lógico a los otros elementos de inteligencia que planteamos en el contexto de los escenarios E3.0: red inteligente, transporte inteligente, etc.

243 Aprendizaje a distancia no presencial apoyado por las TIC. Reduce la demanda de movilidad asociada a la formación al articular la accesibilidad a la misma sin requerimiento de desplazamiento.

244 Incremento del comercio electrónico mediante las TIC. Reduce la demanda de movilidad asociada a la realización de compras al articular la accesibilidad sin requerimientos de desplazamiento.

245 Introducción de inteligencia en la logística asociada al transporte de mercancías, lo que reduce la demanda de movilidad total de mercancías desde su punto de origen hasta el consumidor final.

246 Para los desplazamientos a pie y en bicicleta las unidades de viajero(s)-km/hab.-a son equivalentes a los km/hab.-a, por lo que para unificar las unidades respecto a los otros modos de movilidad hemos mantenido unas unidades comunes.

un 0,17% de la demanda de movilidad total de viajeros.

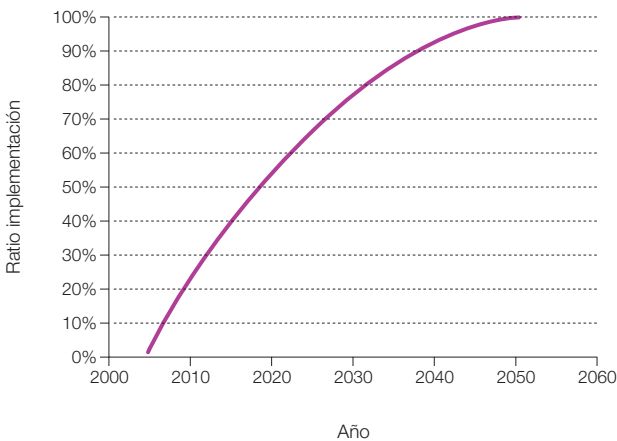
Agrupando todos estos conceptos podemos plantear una reducción de demanda de movilidad en el escenario E3.0 respecto a la del escenario BAU, del 12% para viajeros y del 20% para mercancías. Estas reducciones las podemos considerar como relativamente conservadoras respecto al potencial que nos ofrece la desmaterialización de la economía, pero hemos optado por mantener un planteamiento relativamente conservador en la reducción de las demandas de servicios intermedios²⁴⁷ para no comprometer la demanda de servicios finales que en principio hemos optado por mantener igual que en el contexto BAU.

La consideración de las distintas velocidades a las que se podrían incorporar estas medidas podrían dar lugar a distintos escenarios de transición, tal y como comentamos anteriormente. Sin embargo, para simplificar el

análisis y partiendo del hecho de que la mayoría de estas medidas dependen, para su despliegue, de diversos factores que van más allá de los tecnológicos y conllevan inercias en diversos sistemas, consideraremos un único escenario de transición para desplegar la totalidad de este potencial de reducción de la demanda de movilidad en el año 2050, para definir así la trayectoria asociada al despliegue del contexto E3.0. La figura 71 recoge el ritmo de implementación de esta reducción en demanda de movilidad considerado para el contexto E3.0.

En estas condiciones, los escenarios E3.0 de movilidad específica de viajeros y mercancías quedan tal y como se muestra en la figura 72. Como podemos observar, los escenarios E3.0, si bien presentan una reducción significativa respecto al escenario BAU, siguen sin mostrar visos de contracción y convergencia, y no presentan una tendencia a la estabilización de estas demandas en el periodo de tiempo considerado.

Figura 71. Ratio de introducción de las medidas de reducción de la demanda de movilidad para el escenario E3.0.



247 La demanda de movilidad podemos considerarla como un servicio intermedio, pues incluso con esta reducción planteada en demanda de movilidad asumimos que la demanda y cobertura de servicios finales (accesibilidad, trabajo, educación, etc.) no se ve reducida.

Figura 72. Escenarios E3.0 de movilidad específica de viajeros y mercancías.

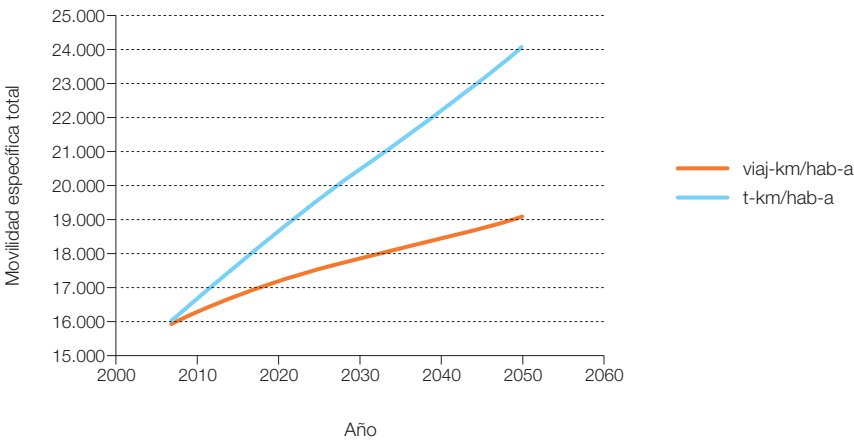
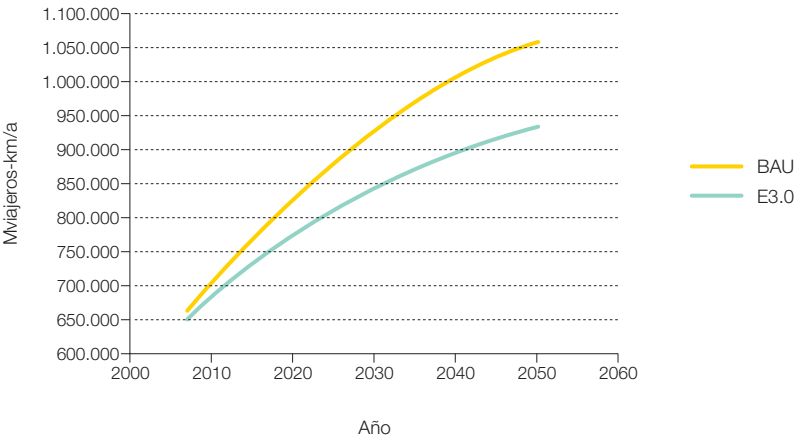


Figura 73. Escenarios BAU y E3.0 de movilidad absoluta total peninsular de viajeros.

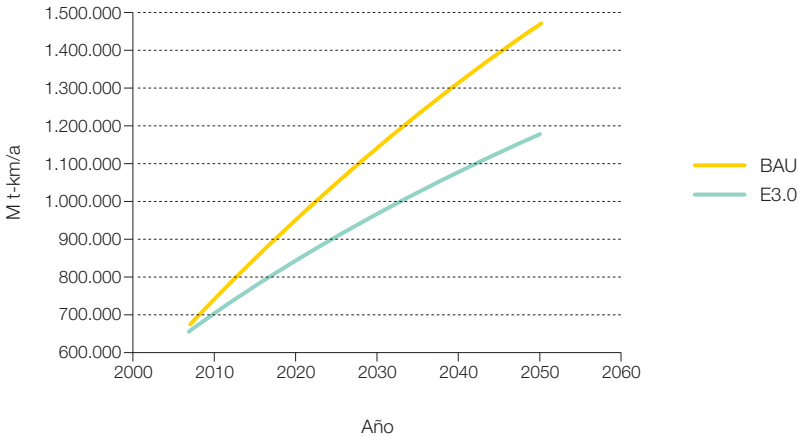


Una de las causas que quedan detrás de este planteamiento es el creciente peso que cabe esperar de las ciudades en la organización socioeconómica en el periodo considerado para el desarrollo de este escenario²⁴⁸, con varias capitales de provincia acercándose a las condiciones que actualmente definen la estructura de la demanda en las grandes urbes de nuestro país.

Cruzando estos escenarios de demanda de movilidad específica de viajeros y mercancías con los escenarios de población peninsular adoptados para este estudio, obtenemos los escenarios de demanda de movilidad absoluta peninsular que recogemos en las figuras 73 y 74, y que constituyen la base para la elaboración de los escenarios de demanda de energía desde el sector transporte.

248 Tanto en los contextos BAU como E3.0. En el E3.0 se podría esperar una cierta estabilización del mundo rural respecto al contexto BAU, pero la tendencia dominante cabe esperar que siga siendo la de consolidación de grandes urbes en las distintas provincias.

Figura 74. Escenarios BAU y E3.0 de movilidad absoluta total peninsular de mercancías.



3.6.2 Escenarios reparto modal

El siguiente paso en la elaboración del escenario de demanda energética, del sector transporte, a partir de la demanda de servicio de movilidad es establecer escenarios de reparto modal de los escenarios de demanda de movilidad total desarrollados en el punto anterior.

Las referencias bibliográficas incluyen poca información relativa al reparto modal, especialmente de cara al año 2050. En (EREC, Greenpeace, 2008) se muestran escenarios de reparto modal bajo un contexto BAU y un contexto de eficiencia de cara al año 2050. En (Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente, 2009), si bien no se proporciona de forma explícita un escenario de reparto modal, sí que se puede deducir de los valores presentados un escenario para 2020. En (EEA, 2008), (Pérez Martínez P.J., Monzón de Cáceres A., 2008), (EU, 2002), (MINECO, IDAE, 2003) y (IDAE, 2007) aparecen escenarios de reparto modal en horizontes más cercanos (2005, 2006, 2010, 2012).

Adicionalmente, y especialmente para el caso del escenario E3.0, hemos incorporado

consideraciones asociadas al despliegue de inteligencia en el sector transporte y a su evolución hacia un predominio de la electricidad como vector energético. Bajo estos supuestos, se modifican sustancialmente las hipótesis subyacentes en la gran mayoría de los escenarios de la bibliografía, de tal forma que las soluciones más eficientes se desplazan hacia otros modos de transporte, por lo que condicionan la evolución de los repartos modales. Por otro lado, bajo el supuesto de un importante despliegue de inteligencia en el sector transporte y de una completa internalización de la gestión de la demanda, es factible producir cambios modales mucho más rápidos de lo que permite una aproximación BAU gobernada por el lado de la oferta y ciega a la gestión de la demanda.

3.6.2.1 Evolución histórica del reparto modal

Si tomamos como base la recopilación de información histórica de demanda de movilidad, presentada en el punto anterior, podemos extraer información relativa a la evolución histórica del reparto modal²⁴⁹ en España.

²⁴⁹ Es importante recordar que en estas evaluaciones de movilidad se incorpora el 50% de movilidad internacional, lo cual afecta significativamente a los repartos modales resultantes. También es conveniente recordar que la información histórica de demanda de movilidad se ha tenido que completar por omisiones. Referirse al capítulo del escenario de demanda de movilidad para más información al respecto.

En la figura 75 mostramos la evolución histórica del reparto modal de movilidad de viajeros no urbana²⁵⁰. Como vemos, este reparto modal está claramente dominado por el transporte por carretera, con un peso creciente de la movilidad aérea. También es destacable el decline de la contribución del ferrocarril. Sin embargo, hay que resaltar que la introducción del tren de alta velocidad ha supuesto una recuperación de terreno del ferrocarril frente al avión, que no se ve reflejado en estos datos históricos que llegan hasta 2007.

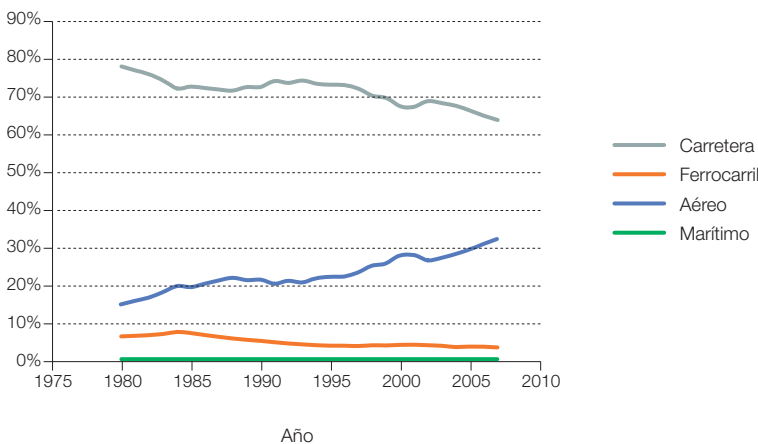
Por lo que respecta al peso de la movilidad urbana de viajeros²⁵¹ sobre la demanda de movilidad total, en la figura 76 podemos observar un peso creciente a lo largo del período analizado, y con tasas de crecimiento crecientes. Este hecho es un reflejo de la tendencia a la emigración de la población hacia las grandes urbes, que se está produciendo en todo el mundo y también en España. A este respecto es interesante observar que en las grandes urbes generan una demanda de movilidad urbana elevada, especialmente de viajeros, superior a la demanda de movilidad

que existe en el mundo rural o pequeñas ciudades de donde proviene la población que origina este flujo migratorio hacia las grandes ciudades. En la actualidad, en España hay dos áreas metropolitanas y ciudades (Madrid y Barcelona) que en términos de población quedan muy por encima del resto, y otras tres o cuatro que están empezando a acercarse a los mismos órdenes de magnitud.

La tendencia dominante que podemos esperar en el futuro, tanto en el contexto BAU como en el E3.0²⁵², es que se vaya incrementando el número de ciudades con elevada población y por tanto la correspondiente demanda de movilidad urbana.

Por lo que respecta a la evolución del reparto modal histórico de la movilidad de mercancías²⁵³, en las figuras 77 y 78 mostramos el correspondiente a la movilidad no urbana, mientras que en la figura 79- recogemos el peso de la movilidad urbana de mercancías²⁵⁴ respecto al total de movilidad de mercancías. Una vez más recordar que la incorporación del 50% de la movilidad exterior distorsiona los resultados

Figura 75. Evolución histórica del reparto modal movilidad interurbana de viajeros.



250 La fuente principal de la que provienen estos datos son los anuarios estadísticos del Ministerio de Fomento y otras publicaciones de este organismo. Sin embargo, tal y como comentábamos en el capítulo dedicado a los escenarios de demanda de movilidad, hemos tenido que completar esas series debido a omisiones y carencias en los datos. Ver capítulo de escenarios de demanda de movilidad para más detalles.

251 La fuente principal de los datos de movilidad urbana, tal y como se refleja en el capítulo dedicado a los escenarios de demanda de movilidad, son los datos reflejados en (MINECO, IDAE, 2003), completada con las hipótesis comentadas en ese capítulo.

252 En el contexto E3.0 se atenúa parcialmente esta tendencia tanto por desmaterialización y mejora de accesibilidad, como por estabilización de la población rural.

253 La fuente principal de la que provienen estos datos son los anuarios estadísticos del Ministerio de Fomento y otras publicaciones de este organismo. Sin embargo, tal y como comentábamos en el capítulo dedicado a los escenarios de demanda de movilidad, hemos tenido que completar esas series debido a omisiones y carencias en los datos. Ver capítulo de escenarios de demanda de movilidad para más detalles.

254 La fuente principal de los datos de movilidad urbana, tal y como se refleja en el capítulo dedicado a los escenarios de demanda de movilidad, son los datos reflejados en (MINECO, IDAE, 2003), completados con las hipótesis comentadas en ese capítulo.

respecto a los que podemos encontrar en otras referencias.

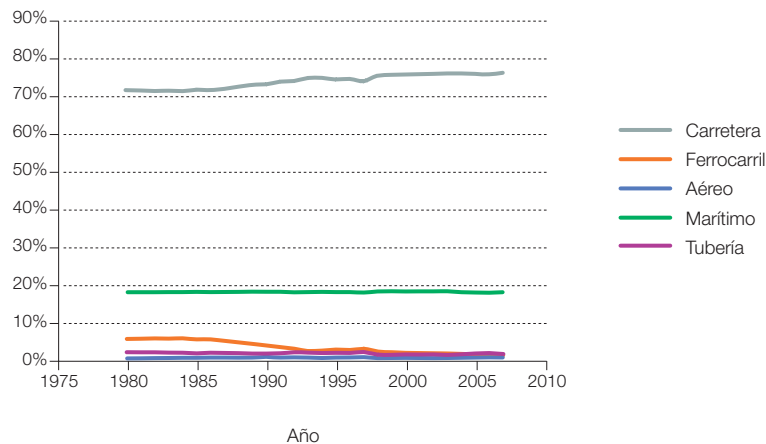
Por lo que respecta a la movilidad no urbana, los aspectos a resaltar son el apabullante pre-

dominio de la movilidad por carretera, con la participación modal que ha mantenido una tendencia creciente en el periodo analizado, y el decline de la movilidad de mercancías por ferrocarril²⁵⁵.

Figura 76. Evolución histórica del peso de la demanda urbana de movilidad de viajeros sobre la demanda total de movilidad de viajeros.



Figura 77. Evolución histórica del reparto modal de movilidad interurbana de mercancías: Todos los modos.



255 Este decline sin duda ha estado influenciado por la gran rigidez del transporte de mercancías por ferrocarril, que requiere en el contexto actual una planificación de un año para no interferir con el transporte de viajeros, y un aprovechamiento considerablemente por debajo del óptimo de la red ferroviaria. La incorporación de inteligencia en el sistema de transporte permitiría eliminar estos inconvenientes, permitiendo al transporte ferroviario acceder a una mayor cota modal en el futuro.

Figura 78. Evolución histórica del reparto modal de la movilidad interurbana de mercancías: excluyendo los modos dominantes (carretera y marítimo).

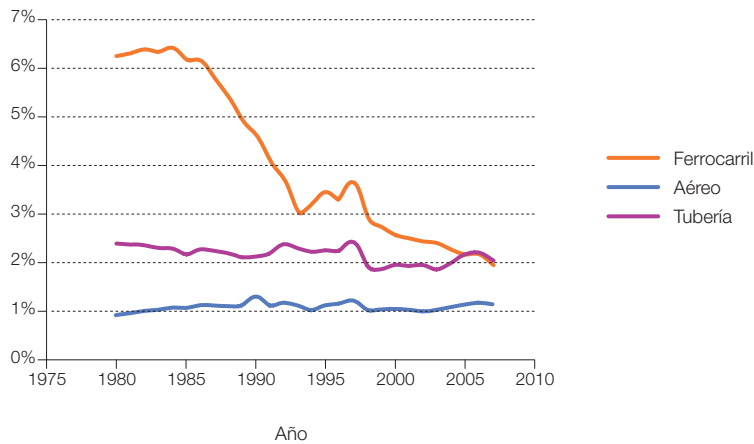
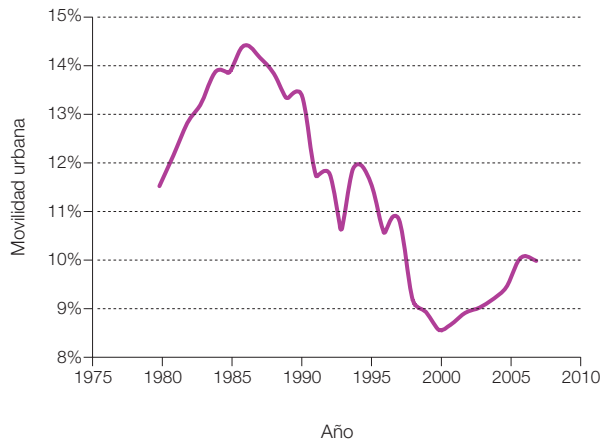


Figura 79. Evolución histórica del peso de la demanda urbana de movilidad de mercancías sobre la demanda total de movilidad de mercancías.



Por lo que respecta al transporte urbano de mercancías, al contrario que en el caso de viajeros, su peso relativo muestra una clara tendencia decreciente respecto al total del transporte de mercancías. Hay dos aspectos que pueden contribuir a esta disminución relativa:

- Una tendencia creciente a la importación de productos de consumo de regiones alejadas a la de destino²⁵⁶.
- La mayor eficacia de la organización urbana de alta densidad por lo que respecta a la distribución de los productos de consumo en su tramo final²⁵⁷.

3.6.2.2 Escenario contribución urbana a demanda movilidad total

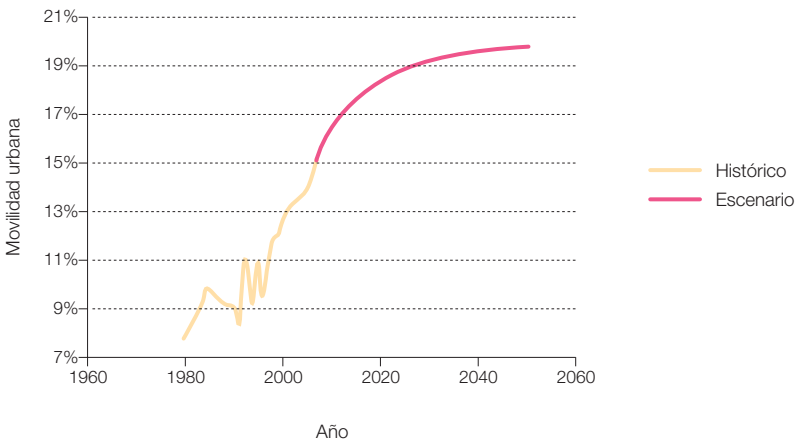
De acuerdo con los resultados presentados en el punto anterior, procedemos en primera instancia a desarrollar un escenario del peso de la movilidad urbana²⁵⁸ sobre la movilidad total.

Hay distintos factores que pueden afectar al peso de la movilidad urbana sobre la total: planificación urbanística, desmaterialización, incremento de la accesibilidad, estabilización población en mundo rural, etc. Y en principio podría esperarse que la evolución de estos factores fuera distinta en el contexto BAU que en el E3.0. Sin embargo, dada la falta de información para cuantificar el efecto de estos aspectos, para la movilidad de viajeros hemos considerado que el peso relativo de la movilidad urbana sobre la total es el mismo para el escenario BAU que para el E3.0²⁵⁹.

En la figura 80 presentamos el escenario de contribución de la movilidad urbana de viajeros sobre el total de la demanda de movilidad de viajeros. Como podemos ver, el escenario parte de las tendencias crecientes históricas para ir evolucionando hacia una saturación de su participación porcentual.

En el caso de la movilidad de mercancías, la evolución histórica no presenta una tendencia tan definida como la de viajeros, por lo que

Figura 80. Escenario de evolución del peso de la movilidad urbana de viajeros sobre la movilidad total de viajeros.



256 En este sentido, en los últimos años hemos asistido a una creciente penetración de productos de consumo procedentes de otras regiones alejadas (disponibilidad de productos alimenticios estacionales a lo largo de todo el año, incremento de productos manufacturados en economías emergentes situadas al otro lado del mundo, etc.).

257 Si bien esta mayor eficacia en la distribución de mercancías en su tramo final (de comercio a consumidor) puede ser a costa de incrementar los requerimientos de movilidad en las etapas previas (necesidad de movilizar recursos de amplias y distantes zonas para satisfacer una demanda con elevado grado de centralización).

258 El alcance del término urbano debe entenderse aquí de forma limitada a la ciudad, sin abarcar toda el área de influencia metropolitana. En este sentido, por ejemplo incluye el transporte en metro pero no el de los trenes de cercanías. Sin embargo esta diferenciación es cada vez más difusa en las grandes urbes, donde empiezan a solaparse las zonas de influencia de estos dos medios de transporte, y donde se van diluyendo las fronteras con las poblaciones circundantes de la gran urbe, tanto físicamente como por lo que se refiere a la demanda de movilidad. Además, debe tenerse presente la gran incertidumbre asociada a la cuantificación de la componente urbana de movilidad. La principal fuente de datos que hemos empleado es la estimación realizada en (MINECO, IDAE, 2003), donde ya se hace hincapié en la gran falta de información estadística fiable correspondiente a este componente de movilidad, que hemos extendido al resto del periodo histórico contemplado con las hipótesis reflejadas en el capítulo de escenarios de demanda de movilidad.

259 Aunque al ser menor la movilidad total en el contexto E3.0, la correspondiente movilidad urbana también será inferior a la del contexto BAU. Nótese que dado que los escenarios de movilidad total ya están fijados, este peso porcentual tan solo afecta a cómo se reparte la demanda de movilidad total entre urbana e interurbana: reducir el peso de la movilidad urbana conduce a incrementar el peso de la no urbana.

todavía es más complicado elaborar una proyección de futuro de esta tendencia. Por otro lado, creemos que el impacto de los elementos diferenciales del escenario E3.0 pueden, en el caso de las mercancías, conducir a una mayor diferenciación respecto al escenario BAU de lo que sucedía en el caso de viajeros. Por este motivo, para el caso de mercancías hemos diferenciado los escenarios de evolución de la contribución urbana en ambos contextos.

En la figura 81 recogemos los dos escenarios de evolución del peso relativo de la movilidad urbana de mercancías. Como vemos, tanto para BAU como para E3.0 se trata de escenarios compatibles con la tendencia creciente de los últimos años que van a estabilizarse en un valor inferior al máximo histórico. El crecimiento de las áreas urbanas, y la tendencia creciente hacia la intermodalidad, en ambos escenarios con el correspondiente desplazamiento de peso porcentual de movilidad hacia los tramos finales del recorrido de las mercancías, apuntan hacia un incremento de la

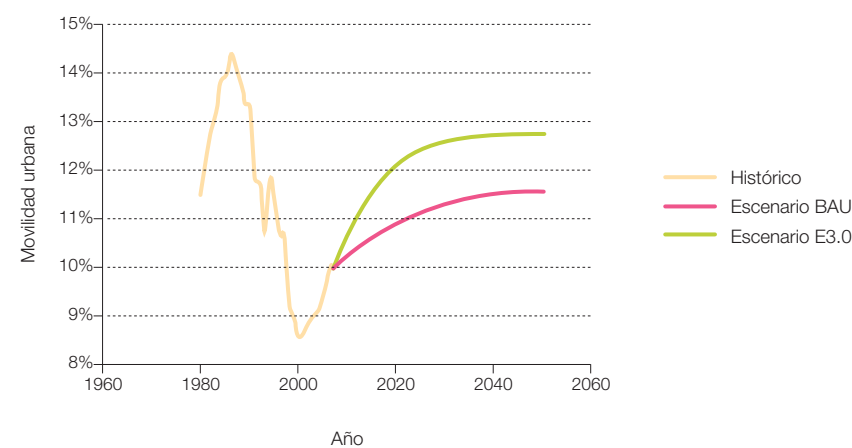
movilidad urbana de mercancías. Dado que en el contexto E3.0 la movilidad interurbana va a estar más acotada, cabe esperar que el porcentaje de estabilización del peso de la movilidad urbana sea superior en este caso.

3.6.2.3 Escenarios de reparto modal en movilidad urbana de viajeros

De acuerdo con las consideraciones anteriores, el desglose de la movilidad de viajeros²⁶⁰ entre urbana y no urbana para los escenarios BAU y E3.0 queda, en términos de movilidad específica²⁶¹ como aparece recogido en las figuras 82 y 83.

Por lo que respecta a los escenarios de reparto modal²⁶² del *transporte urbano de viajeros*, en términos de las tres grandes categorías modales de movilidad motorizada²⁶³ (particular carretera, colectivo carretera y colectivo metro)²⁶⁴, los escenarios BAU y E3.0 adoptados son los mostrados en las figuras 84 y 85.

Figura 81. Escenarios BAU y E3.0 de evolución del peso de la movilidad urbana de mercancías sobre la movilidad total de mercancías.



²⁶⁰ Por lo que se refiere a la movilidad motorizada.

²⁶¹ En términos de demanda de movilidad, la mejora del contexto E3.0 frente al BAU es, tal y como comentamos anteriormente en el punto comentado a los escenarios de movilidad, conservadora, y se limita al despliegue de un potencial de un 12% de mejora de forma gradual hasta el año 2050.

²⁶² En el contexto E3.0, para el reparto modal, también cabría plantearse una situación límite definida por la tecnología E3.0 (fundamentalmente el despliegue del STI), y una serie de escenarios de transición desde el contexto BAU a la tecnología E3.0. Sin embargo, por simplicidad hemos adoptado un único escenario de transición para el reparto modal, de tal forma que las figuras correspondientes al contexto E3.0 muestran ya el escenario de transición adoptado.

²⁶³ Los gráficos que siguen muestran los modos de movilidad motorizada. Los modos de movilidad no motorizada no aparecen reflejados directamente, y actúan como una reducción de la demanda de movilidad motorizada, debido a que el objetivo de este estudio es el análisis de implicaciones energéticas del transporte.

²⁶⁴ Es de notar que en visiones más futuristas en las que se dispusiera de vehículos modulares de bajo consumo para desplazamiento aéreo, la movilidad urbana contaría con un modo adicional que dada su gran flexibilidad podría llegar a ser dominante sobre todos los demás, al liberar todo el espacio aéreo encima de las urbes para implementar modos de transporte con una muy baja dependencia de infraestructuras y con gran flexibilidad. Una primera aproximación a esta situación en la que se busca explotar el potencial del espacio aéreo para acoger parte de la movilidad, pero con las rigideces de infraestructura asociadas a los modos terrestres y por tanto sin la flexibilidad asociada a eliminar esta dependencia, la empezamos a ver en los trenes ligeros elevados. Sin embargo, la ausencia, en la actualidad, incluso a nivel prototipo, de propuestas de movilidad viables en este modo que no incurran en las dependencias de infraestructura de los modos terrestres, y que puedan sacar partido de la gran flexibilidad asociada a la independencia de

Figura 82. Escenarios BAU de movilidad específica de viajeros urbana y no urbana.

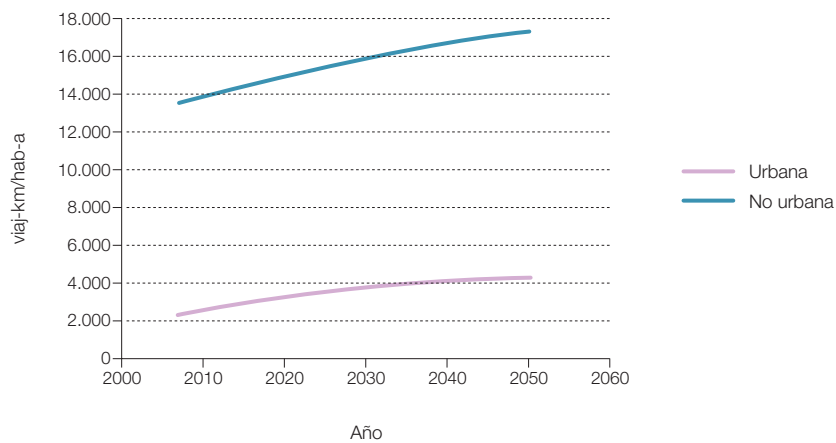
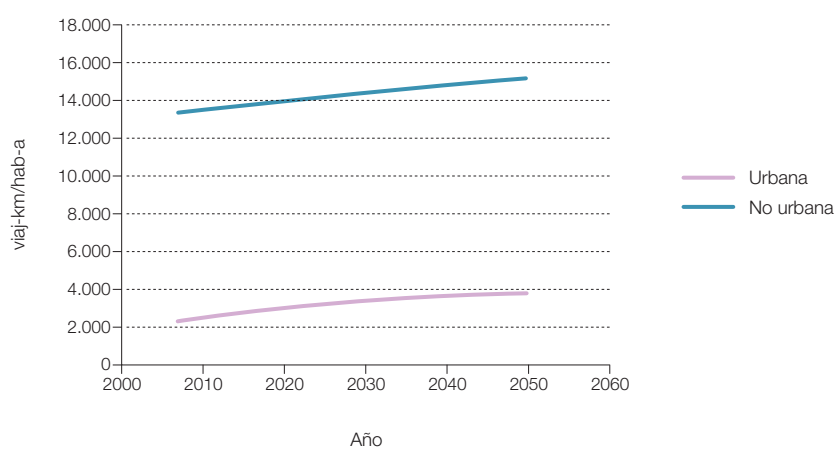


Figura 83. Escenarios E3.0 de movilidad específica de viajeros urbana y no urbana.



Respecto a la división adoptada para la nomenclatura modal es obvio que las distinciones básicas que hacemos son entre ferrocarril y carretera, y entre particular y colectivo. No se hace diferenciación alguna en relación al carácter privado o público del modo de transporte, pues en el contexto global de nuestro análisis es menos relevante²⁶⁵. Así, un coche podrá ser particular si es propiedad de un individuo, o colectivo si pertenece a una empresa de servicios

de transporte, y un autobús podrá ser de una empresa de transportes pública o privada. En el contexto del escenario E3.0 esta diferenciación cobra más relevancia, porque al adaptar la oferta de movilidad a la demanda real, la optimización energética requerirá disponer de distintos tamaños de vehículo (desde la moto al autobús y el metro) para ofrecer el servicio de movilidad requerido con la elasticidad demandada y con altos factores de capacidad.

infraestructuras, así como la existencia de una grandísima inversión en infraestructura terrestre para movilidad urbana que en el marco de un STI habría que optimizar, ha dejado esta posibilidad de liberación del modo aéreo urbano fuera del alcance del planteamiento de contexto E3.0 realizado. De hecho, el modo aéreo para movilidad interurbana, en sus condiciones actuales de desarrollo, es el que introduce una mayor rigidez y complejidad en el sector transporte para reencaminarse hacia la sostenibilidad, dada la inviabilidad de su electrificación a gran escala.

²⁶⁵ Otro matiz entre transporte colectivo y transporte público es que en el contexto de un STI las iniciativas privadas de transporte colectivo pueden romper algunas ineficiencias del transporte público actual, y sobre todo viabilizar mayores velocidades de cambio de la estructura del sector transporte.

La diferencia fundamental entre los enfoques BAU y E3.0 es la gran reducción del modo particular carretera en el escenario E3.0 a favor del colectivo carretera (y, en menor medida, del colectivo metro). Sin embargo, es preciso interpretar correctamente estas proyecciones, pues en el contexto BAU no sería viable plantear un cambio modal tan radical como el que aparentemente muestran estas figuras. En efecto, la diferencia fundamental de los escenarios planteados no es la migración hacia los modos de transporte que hoy denominamos como transporte público (bus) desde el que denominamos privado (coche/moto), sino el cambio de propiedad de los vehículos que hoy denominamos privados (coche/moto). Es decir, en el escenario E3.0 los modos colectivos alcanzan una implementación muy superior, pero emplean una mayor diversidad de vehículos: coche eléctrico, bus eléctrico distintos tamaños y metro. De esta forma, el transporte colectivo aumenta su flexibilidad por el lado de la oferta para adaptarse mejor a la estructura de la demanda de movilidad, proporcionado ese servicio a los usuarios finales en unas condiciones mucho más favorables²⁶⁶ que las asociadas al uso particular de esos vehículos.

Este planteamiento puede parecer en principio un tanto “radical”, sobre todo por su distanciamiento con los otros escenarios que se encuentran en la literatura y por el enfoque conceptual actual del sector transporte. El elemento conceptual fundamental que permite apoyar este planteamiento es el de la implementación de un STI²⁶⁷: En el fondo no hablamos de desplazamiento del coche por el transporte público convencional, sino que gran parte de ese nuevo transporte colectivo son coches de distintos tamaños operados por el STI y sobre los que el usuario contrata servicios de movilidad.

Limitaremos este enfoque “radical” al ámbito urbano, apoyándonos en el hecho de que es en este ámbito donde cabe esperar que la oferta del STI sea muy superior y rentable para los usuarios²⁶⁸, por lo que los desplazamientos en vehículo particular (aunque siga existiendo la propiedad de estos vehículos) se verán reducidos a un mínimo.

El metro es un medio de transporte que merece comentarios específicos. En el contexto BAU, el cambio modal hacia el metro constituye uno de los principales mecanismos de incrementar la eficiencia del transporte urbano. Sin embargo, la participación modal de este modo es actualmente muy baja, y su capacidad de desplazar al modo dominante (transporte particular por carretera) muy limitada como consecuencia de su rigidez. En un contexto E3.0, el metro no constituye el modo de transporte de mayor eficacia, pues el transporte eléctrico por carretera bajo el paraguas de un STI alcanza rendimientos más elevados, además de permitir un desplazamiento a ritmo muy superior al modo menos eficiente (particular carretera) gracias a su mayor flexibilidad. Sin embargo, allí donde la red de metro ya se ha desarrollado, el STI debería tender a optimizar esa infraestructura existente y hacerla evolucionar hacia mayores niveles de eficiencia, mediante la interacción sinérgica con el modo de transporte colectivo por carretera, básicamente mediante el incremento del factor de capacidad²⁶⁹ con el que se usa el metro gracias a la flexibilidad adicional que le puede proporcionar su interacción modal con el modo carretera colectivo. En este sentido, el modo carretera colectivo puede actuar en cierta medida como facilitador del incremento de la participación modal del metro. De igual forma, el STI puede potenciar la intermodalidad con los medios de transporte no motorizados, y facilitar el incremento de la participación modal del metro.

²⁶⁶ Globalmente favorables debido a que el factor de capacidad de los coches colectivos es mucho más elevado que el de los particulares, lo que permite además una mayor tasa de renovación de los equipos para mantenerse en el óptimo tecnológico, y favorable para el demandante del servicio de movilidad, por aliviarle de todos los inconvenientes asociados a la propiedad del vehículo (inversión, mantenimiento, aparcamiento, acceso a última tecnología, etc.).

²⁶⁷ Sistema de Transporte Inteligente.

²⁶⁸ Otra gran ventaja del STI en este ámbito urbano es la gran reducción de la congestión que conlleva.

²⁶⁹ Actualmente el factor de capacidad con el que se usa el metro es muy bajo, a pesar de los apretos que podemos experimentar en hora punta, como consecuencia de su rigidez al ser un modo de transporte gobernado por la oferta. En efecto, los factores de capacidad del metro pueden ser en media anual del orden del 17% al 15% (Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Fomento, 2008), aunque otras referencias apuntan a valores más altos que probablemente se refieran a condiciones típicas de uso.

Por este motivo, en el contexto E3.0 planteamos un despegue de la participación modal del metro en los primeros años del periodo considerado, impulsado por el despegue de la participación modal del modo carretera colectivo, para posteriormente estabilizarse en los niveles de cobertura de movilidad por la

mayor dificultad de justificar inversiones adicionales en infraestructura una vez que ya está disponible un modo de transporte más flexible y de mayor nivel de eficiencia.

En términos de movilidad absoluta, la figura 86- nos muestra los escenarios de movilidad

Figura 84. Escenarios BAU de reparto modal del transporte urbano motorizado de viajeros.

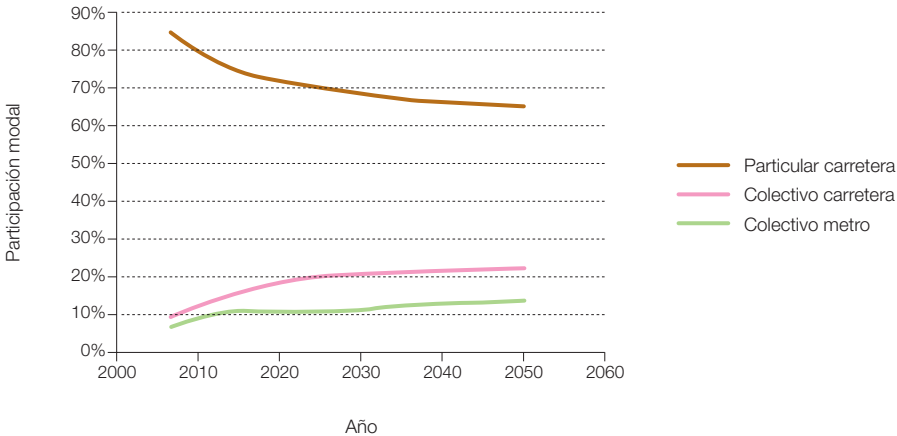
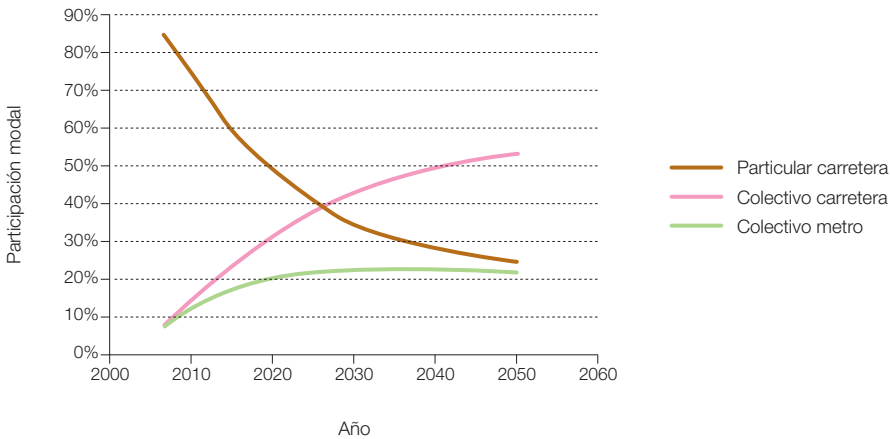


Figura 85. Escenarios E3.0 de reparto modal del transporte urbano motorizado de viajeros.



urbana de viajeros²⁷⁰ en los contextos BAU y E3.0, mientras que las figuras 87 y 88 nos muestran las contribuciones de los distintos modos en los contextos BAU y E3.0.

Dentro del modo “particular carretera” puede resultar conveniente diferenciar entre

motos y coches debido a la distinta evolución de sus consumos específicos. En el contexto E3.0 esta diferenciación no es tan relevante, pues siendo vehículos eléctricos, en términos de movilidad, estos dos modos de transporte tienen un consumo muy parecido. Por el contrario, en el contexto BAU sí

Figura 86. Escenarios BAU y E3.0 de movilidad absoluta urbana motorizada de viajeros.

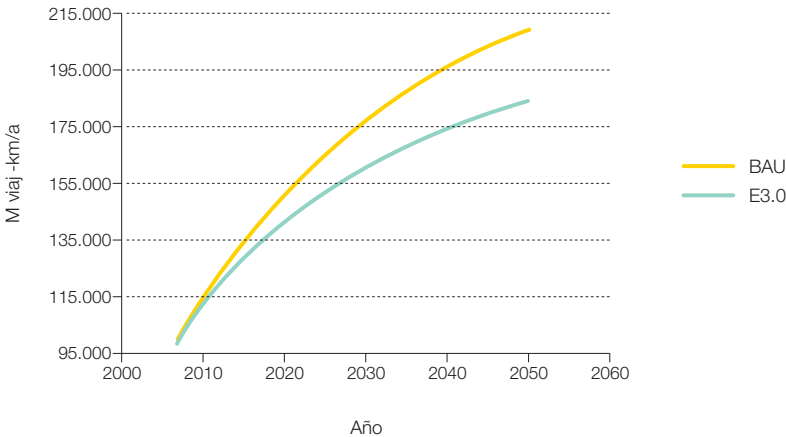
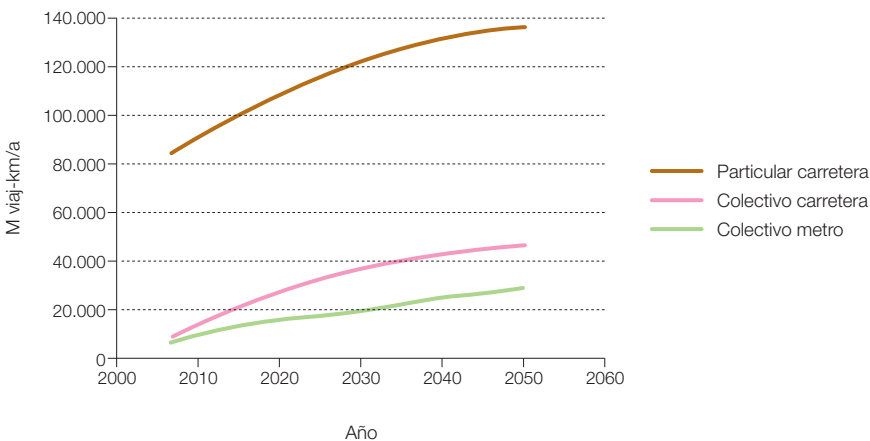


Figura 87. Escenarios BAU de movilidad absoluta urbana de viajeros para los distintos modos motorizados.



270 Si bien a primera vista puede parecer que tanto en el contexto BAU como en el E3.0 se experimenta un gran crecimiento de la movilidad urbana a lo largo del periodo temporal analizado, al observar los resultados bajo la perspectiva de la evolución histórica se constata que en los escenarios planteados no solo se introduce una tendencia a la saturación del peso de esta movilidad sobre el conjunto de la movilidad, sino que además las tasas de crecimiento medias anuales planteadas son muy inferiores a las históricas. En efecto, en términos de peso de la movilidad urbana frente a la movilidad total, tanto los escenarios BAU como E3.0 plantean un crecimiento anual medio del orden de un tercio de los valores históricos. En términos de la movilidad per cápita, el contexto E3.0 conduce a un crecimiento anual medio del 1,2%/a, mientras los valores históricos entre 1990 y 1999, según estimación de (MINECO, IDAE, 2003) eran del 11,5%/a, y la serie histórica completada entre 1980 y 2007 experimentaba un crecimiento medio del 13,4%/a. En términos de movilidad absoluta urbana, el escenario E3.0 plantea un crecimiento anual medio del 2%/a, mientras que el valor histórico entre 1990 y 1999 asciende a 12,1%/a, llegando a 16,7%/a si consideramos la serie histórica completada entre 1980 y 2007. Por tanto, podemos concluir que los incrementos de movilidad urbana planteados por estos escenarios son bastante más bajos que los que cabría esperar según las tendencias históricas, lo cual responde a unos planteamientos, por un lado, de saturación de la demanda de movilidad urbana, y por otro lado de una cierta tendencia de estabilización de la población rural (especialmente en el escenario E3.0). El incremento de la movilidad urbana per cápita responde a la tendencia dominante de incremento de la población urbana respecto a la rural, mientras que el mayor incremento en la movilidad absoluta refleja el crecimiento de la población del escenario poblacional adoptado.

que es necesario hacer esta diferenciación porque la moto acaba siendo menos eficiente²⁷¹. Diferenciamos entre urbano/interurbano, pues la congestión y los temas de disponibilidad de aparcamiento justifican la evolución con tendencias contrarias. En la figura 89 mostramos estos escenarios.

3.6.2.4 Escenarios de reparto modal en movilidad urbana de mercancías

En el capítulo dedicado al desarrollo de escenarios de movilidad se indicaron las hipótesis que conducían a los escenarios de movilidad total de mercancías, tanto en el contexto BAU

Figura 88. Escenarios E3.0 de movilidad absoluta urbana de viajeros para los distintos modos motorizados.

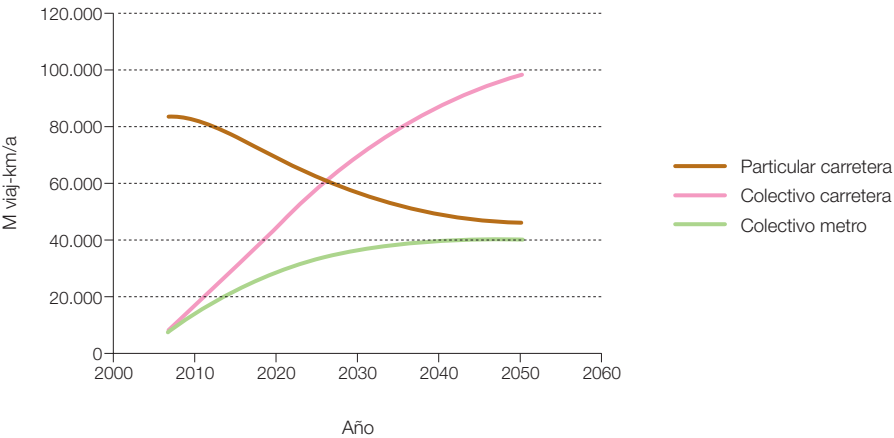
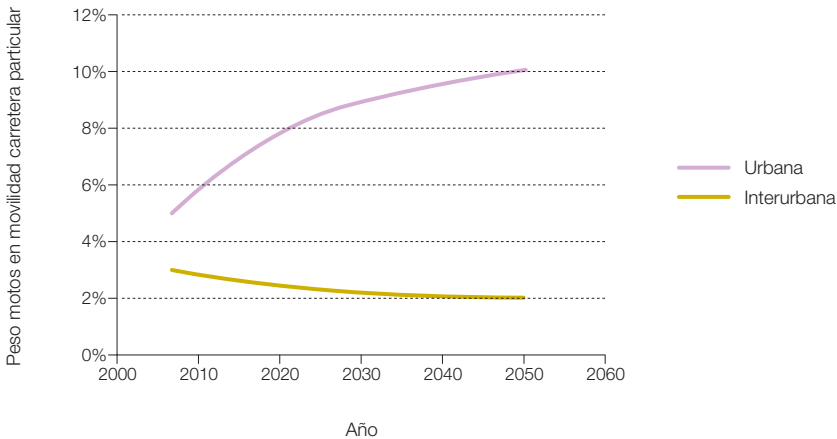


Figura 89. Escenarios de participación de las motos sobre la movilidad particular por carretera en el escenario BAU.



271 Debido principalmente a su mayor dificultad de hibridación por limitaciones de espacio.

como en el E3.0. Para el contexto E3.0 se exponían una serie de actuaciones que conducirían a una reducción en la demanda total de movilidad del 20%. Posteriormente, desarrollamos unos escenarios del peso de la movilidad urbana de mercancías sobre el total de movilidad de mercancías, también diferenciando los contextos BAU y E3.0. De acuerdo

con estas consideraciones anteriores, el desglose de la movilidad de mercancías entre urbana y no urbana para los escenarios BAU y E3.0 queda, en términos de movilidad específica como aparece recogido en las figuras 90 y 91. En términos del reparto modal, para la movilidad urbana de mercancías solo se considera un modo: la carretera.

Figura 90. Escenarios BAU de movilidad específica de mercancías urbana y no urbana.

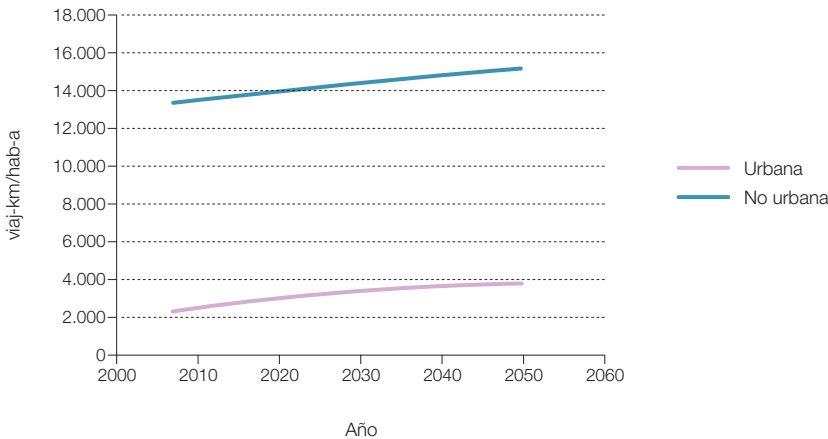


Figura 91. Escenarios E3.0 de movilidad específica de mercancías urbana y no urbana.

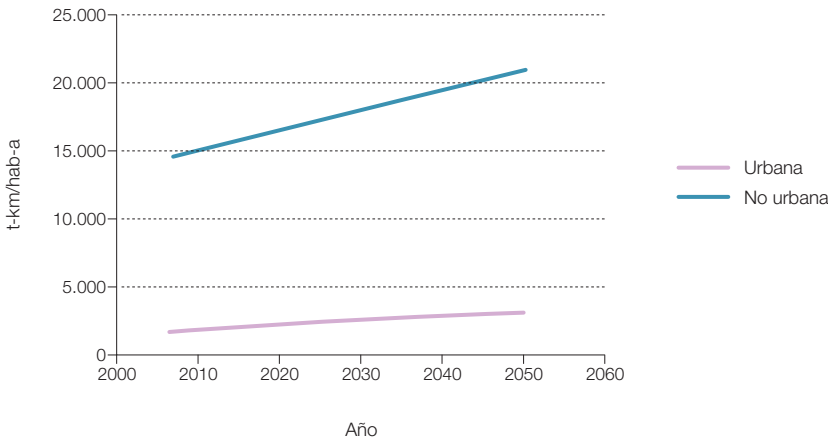
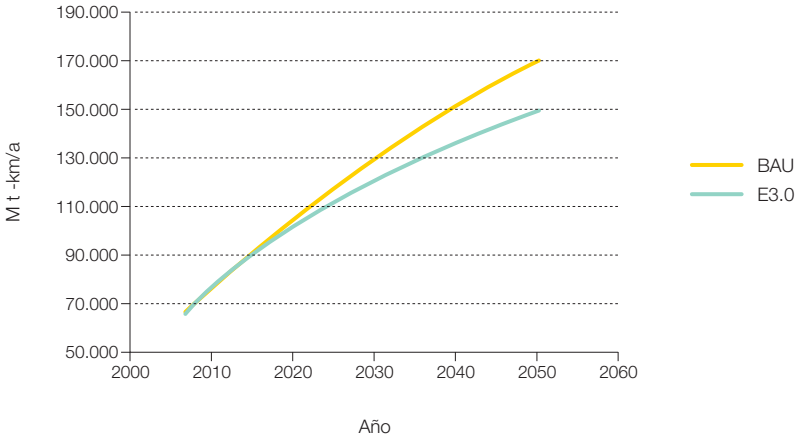


Figura 92. Escenarios BAU y E3.0 de movilidad absoluta urbana de mercancías.



En términos de movilidad absoluta, la figura 92 nos muestra los escenarios de movilidad urbana de mercancías en los contextos BAU y E3.0, que como hemos comentado corresponde toda ella al modo carretera.

3.6.2.5 Escenarios de reparto modal en movilidad no urbana de viajeros

Partimos de la evolución histórica del peso de cada uno de los modos de movilidad no urbana de viajeros²⁷², y hemos procedido a elaborar escenarios de evolución de la participación modal para los contextos BAU y E3.0. En las figuras 93 a 96 mostramos dichos escenarios²⁷³ para cada uno de los modos de transporte de forma comparativa para los contextos BAU y E3.0.

Respecto a la movilidad de viajeros por barco, en el contexto BAU planteamos un escenario decreciente en términos porcentuales, pues debido a los mayores tiempos de desplazamiento parece difícil que pueda crecer su participación: resulta poco competitivo respecto a los otros modos. En el contexto

E3.0, si tenemos en cuenta que la movilidad interurbana incorpora el 50% de desplazamientos exteriores, planteamos una potenciación del transporte marítimo de pasajeros encaminada a descargar el peso sobre el modo aéreo, que resulta más difícil de cubrir con energías renovables. Sin embargo, debido a los mayores tiempos de desplazamiento²⁷⁴ es difícil plantearse que este modo llegue a alcanzar pesos relativos importantes.

Respecto a la movilidad por ferrocarril, en el contexto BAU planteamos un escenario que tiende a una ligera recuperación de este modo de transporte. En el contexto E3.0 planteamos una mayor participación porcentual de este modo de transporte, apoyada por un lado por el STI, y por otro lado por la reducción de la movilidad total que afecta principalmente a otros modos de transporte. En efecto, el STI permite plantear un significativo incremento de la movilidad por tren al facilitar el transporte a, y desde las estaciones. Este cambio de tendencia viene impulsado en las primeras etapas por la entrada del tren de alta velocidad sustituyendo vuelos nacionales, y posteriormente se acelera con la progresiva implementación del STI.

²⁷² Como indicamos en el capítulo correspondiente a la elaboración de los escenarios de movilidad, la fuente principal empleada para los históricos son los diversos anuarios del Ministerio de Fomento, así como otras publicaciones del Ministerio de Fomento, y la estimación desarrollada en (MINECO, IDAE, 2003) para la movilidad urbana.

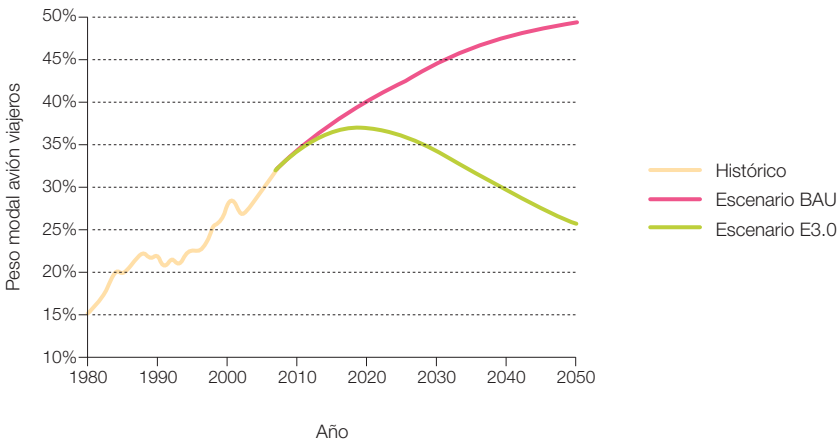
²⁷³ Para la transición al contexto E3.0 en lo referente al reparto modal, podrían plantearse las condiciones asociadas a la tecnología E3.0 y distintos escenarios de transición, pero para simplificar, en el caso de los repartos modales consideramos un único escenario de transición que ya se encuentra incorporado en los resultados presentados.

²⁷⁴ Cabe plantearse un cierto desplazamiento modal del avión al barco para los viajes de ocio, pero no hay opciones de que el modo marítimo compita con el aéreo para desplazamientos laborales.

Respecto a la movilidad de viajeros por avión, en el contexto BAU planteamos un escenario tendencial en que este modo sigue incrementando su peso porcentual, con tasas de crecimiento decrecientes, pero sin llegar a invertir la tendencia histórica. Este modo de transporte es crítico desde el punto de vista de la descarbonización del sistema, pues prácticamente la única alternativa al uso de los combustibles fósiles son los biocombustibles. El hidrógeno es otra alternativa, pero requiere emplear una cantidad superior de recursos renovables debido a sus menores rendimientos de conversión (en torno a un 43% para el H₂ líquido, frente a un 67% típico de un biocombustible líquido), por lo que es significativamente más caro. Si bien existe alguna primera experiencia de avión eléctrico con aviones pequeños y vuelos cortos, en la actualidad no parece viable plantearse un escenario con una electrificación significativa del transporte aéreo. Por tanto, en el contexto E3.0 interesa plantear una máxima migración del modo aéreo a otros modos de transporte

con mayores opciones de incorporar energías renovables. Sin embargo, debemos tener presente que en 2007 la aviación interior (aquella más susceptible de ser sustituida por otros modos de transporte) constituía un 7% del total de aviación²⁷⁵, por tanto, lo que domina es la aviación exterior, más difícilmente sustituible por el tren o la carretera, y para la cual cabe esperar que siga creciendo la demanda de movilidad, por lo menos durante los primeros años del escenario. En el contexto E3.0 se han aplicado reducciones importantes de demanda de movilidad por motivos de negocios/trabajo basándose en la desmaterialización (sustitución desplazamientos por teleconferencias, etc.), lo cual permite plantear mayores reducciones del peso modal para la aviación. Las tendencias actuales de crecimiento, junto a la progresiva implementación de la desmaterialización, el desplazamiento interior hacia el ferrocarril y las propias medidas de eficiencia en el sector aviación, conducen a un escenario con un máximo en demanda de movilidad aérea en torno al año 2020.

Figura 93. Peso modal de la movilidad interurbana de viajeros por avión. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.



275 Datos correspondientes a anuarios del Ministerio de Fomento, en términos de movilidad. Sin embargo, en el contexto de los escenarios aquí planteados, solo consideramos el 50% de la movilidad exterior, por lo que el peso de la aviación interior asciende al 13% respecto al total de la movilidad por aire.

Por lo que respecta a la movilidad por carretera, el escenario BAU sigue las tendencias actuales de decrecimiento del peso porcentual de este modo de transporte de viajeros, mientras que en el contexto E3.0 el mayor uso que hace el STI del transporte por carretera para favorecer la intermodalidad, así como la reducción de

la demanda de movilidad en otros modos²⁷⁶, hace que se vayan atenuando las tasas de decrecimiento para alcanzar un mínimo en torno al 2030 y luego tender a estabilizarse.

En las figuras 97 a 100 mostramos la evolución de los escenarios de reparto modal en

Figura 94. Peso modal de la movilidad interurbana de viajeros por carretera. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.

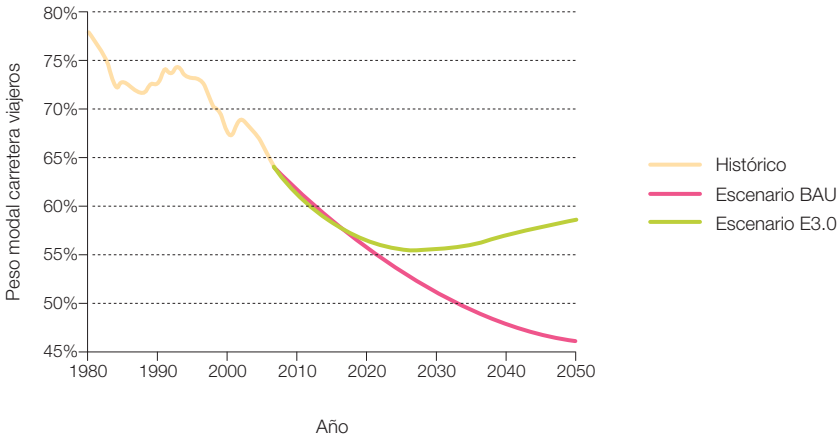
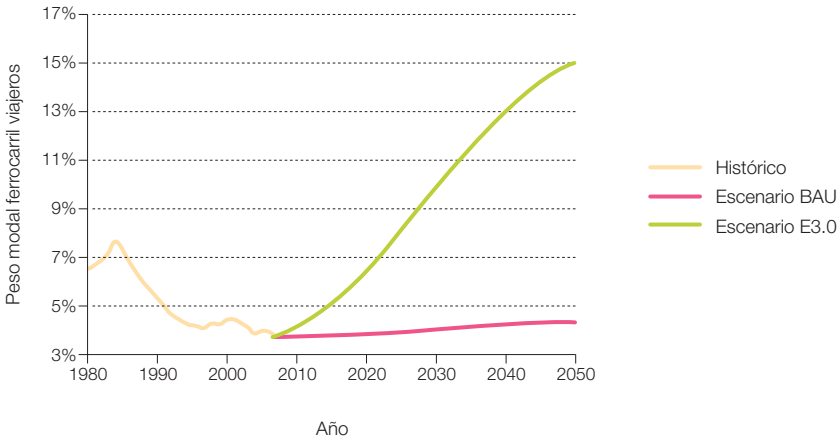
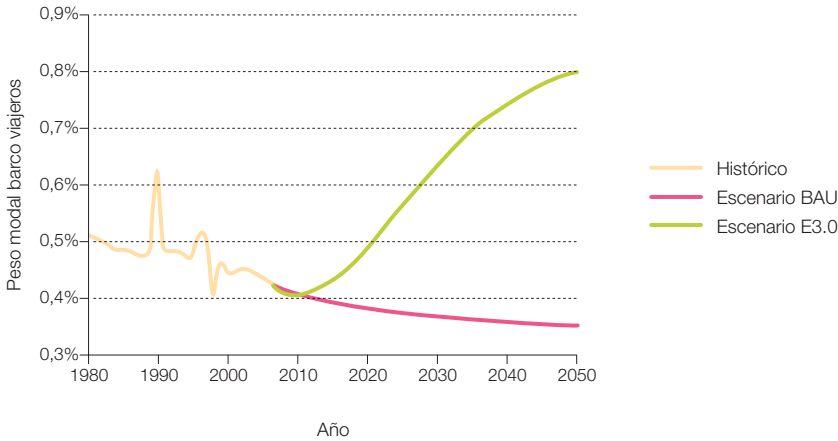


Figura 95. Peso modal de la movilidad interurbana de viajeros por ferrocarril. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.



276 Que conducen a una reducción de la demanda de movilidad total y por tanto al incremento del peso relativo de la movilidad por carretera que no experimenta la misma reducción.

Figura 96. Peso modal de la movilidad interurbana de viajeros por barco. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.



los contextos BAU y E3.0 para la movilidad interurbana de viajeros. Las figuras recogen los correspondientes valores de movilidad absoluta peninsular en estas condiciones para cada uno de los modos de transporte de viajeros.

Como podemos ver, en el contexto BAU, el modo carretera, si bien domina la movilidad en la primera parte del periodo analizado, va reduciendo gradualmente su peso relativo²⁷⁷, para pasar, hacia el año 2040, a ceder el primer lugar modal al transporte aéreo. El transporte aéreo mantiene su tendencia actual de crecimiento, y a pesar de que las tasas de crecimiento se van reduciendo a lo largo del escenario, no llega a saturarse, y pasa a ser el modo de transporte dominante. Esta situación, impulsada por las estrategias que hemos vivido en los últimos años del bajo coste de los vuelos, resulta tremendamente problemática desde la perspectiva de la sostenibilidad, al ser el modo aéreo el más problemático desde el punto de vista de la sustitución de los combustibles fósiles. Este escenario BAU, con tasas de evolución de los modos carretera y aéreo, incluso más favorables que las

registradas en la evolución histórica reciente, nos muestra la necesidad de actuación decidida para evitar que se despliegue este escenario, que nos dificultaría mucho para reencaminar el sector del transporte hacia la sostenibilidad.

En el contexto E3.0, se consiguen invertir las tendencias anteriormente comentadas, y se consigue que el modo aéreo alcance un pico en torno al año 2020. Sin embargo, a pesar de ello, el modo aéreo sigue siendo el segundo en importancia, por detrás de la carretera, a lo largo de todo el escenario, por lo que seguirá suponiendo una complicación desde el punto de vista de un sistema energético sostenible. Esta inversión de tendencia en el modo aéreo se consigue, por un lado, mediante la reducción de demanda de movilidad por desmaterialización, especialmente centrada en este modo de transporte, y por otro lado impulsando el modo ferrocarril apoyado por el modo carretera en un contexto de STI.

Es importante resaltar que para conseguir una sustitución significativa del modo aéreo por el

277 Las tasas de decrecimiento mantienen la tendencia histórica, pero se van reduciendo al ir avanzando a lo largo del escenario.

modo ferrocarril, parece imprescindible potenciar las líneas de ferrocarril capaces de competir en tiempo y servicio con la aviación, apoyadas por un sistema de transporte por carretera que optimice la conexión intermodal con dicha red de ferrocarriles de alta velocidad²⁷⁸. En efecto, la capacidad de los trenes de alta velocidad para proporcionar el servicio de movilidad con tiempos comparables al modo aéreo, parece ser el principal mecanismo capaz de desplazar al modo aéreo. A nivel de vuelos interiores en España, ya estamos asistiendo a esta situación en líneas como la Madrid-Barcelona, y esto es sin la existencia de un STI que permita optimizar el acoplamiento intermodal con el transporte por carretera para “acercar” más el ferrocarril a los demandantes de movilidad. Esta situación podría extenderse incluso para abarcar los desplazamientos internacionales a los países más cercanos si se mejoraran las conexiones internacionales de la red de trenes de alta velocidad, de tal forma que el modo aéreo quedara limitado a aquellos desplazamientos de mayor distancia, para los cuales existiera ya un escalón inadmisibles para el usuario entre los tiempos requeridos por el modo ferrocarril y el aéreo.

También es interesante comentar la evolución del modo carretera en el escenario E3.0, pues el escenario planteado es contrario tanto a la tendencia actual como a lo que habitualmente se da por supuesto al pensar en un sistema de transporte sostenible. En efecto, el escenario planteado conduce a un mínimo en el peso modal de la carretera en torno al año 2025, para posteriormente pasar a incrementar ligeramente su contribución modal tendiendo a una estabilización hacia los años finales del escenario considerado. En términos de movilidad absoluta vemos cómo para los años finales, a pesar de que la demanda de movilidad total en E3.0 es sensiblemente

inferior a la de BAU, el modo carretera tiene una demanda de movilidad absoluta superior en el contexto E3.0. Estos planteamientos pueden resultar inicialmente un tanto sorprendentes. Sin embargo, debe tenerse presente que el modo carretera planteado en E3.0 es un modo de transporte radicalmente distinto al modo carretera en BAU. En efecto, el modo carretera en E3.0 es un modo totalmente electrificado y apoyado por un STI que proporciona elevados factores de capacidad, de tal forma que los consumos específicos que proporciona son de los más favorables entre todos los modos de transporte disponibles. En este contexto, el modo carretera pasa de ser un modo del que conviene alejarse desde el punto de vista del ahorro energético, a uno de los modos más favorables²⁷⁹. Por otro lado, el requisito de alcanzar un desplazamiento significativo del modo aéreo requiere de una fuerte implicación del modo carretera, actuando como facilitador del modo ferrocarril al optimizar el acoplamiento modal desde las estaciones terminales de la línea de ferrocarriles hacia los puntos de origen y destino de la demanda de movilidad: en este contexto, el modo carretera (también eléctrico como el ferrocarril, y con un consumo específico comparable), puede entenderse como una ramificación del modo ferrocarril para llegar hasta la puerta del origen y destino de las demandas de movilidad.

Un concepto importante que subyace en los planteamientos del contexto E3.0 es que una de las funciones del despliegue del STI es la optimización de aquellas infraestructuras de transporte que ya tenemos implementadas, y que por tanto constituyen una importante inversión energética, que debemos optimizar en el contexto de la operación global del sistema de transporte, siempre y cuando la participación de los modos de transporte que se apoyan en esas inversiones resulte favorable desde

278 Dado que el horizonte en el que se mueven las proyecciones de este informe resulta tan lejano, se denominará tren de alta velocidad a cualquier ferrocarril capaz de competir con los servicios proporcionados por la aviación, independientemente de la tecnología usada. Esto no significa que este tipo de ferrocarriles se haga, como ocurre en la realidad española, en detrimento del acceso a ciudades de menor población o de las líneas de media distancia cuyo objetivo es diferente del de sustituir el avión.

279 Las implicaciones favorables del modo carretera van más allá de sus bajos consumos específicos, pues en el marco de un sistema energético integrado, este modo de transporte ofrece complementos muy favorables para el sistema eléctrico desde el punto de vista de la regulación asociada a la gestión de la demanda y a la participación activa en el sistema, mediante el V2G y la capacidad de acumulación distribuida que proporcionan las baterías de estos vehículos.

el punto de vista del conjunto del sector transporte. En este sentido, los modos de transporte carretera y ferrocarril son dos modos en los que ya hemos realizado una gran inversión en infraestructuras, y que permiten una operación energéticamente eficiente en el contexto E3.0 cuando se electrifican. Además, estos dos modos son modos fuertemente

infrautilizados en la actualidad, y el STI puede actuar de facilitador para mejorar el uso que hacemos de esas infraestructuras. Por lo que respecta al modo carretera, el principal motivo de su infrautilización actual es su operación caótica y totalmente ausente de inteligencia, seguido por los bajos factores de capacidad a los que conduce el uso del vehículo particular.

Figura 97. Peso modal de la movilidad interurbana de viajeros en escenario BAU.

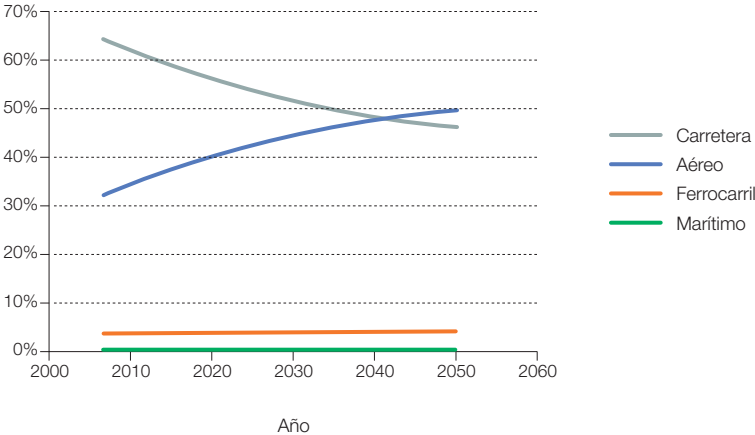
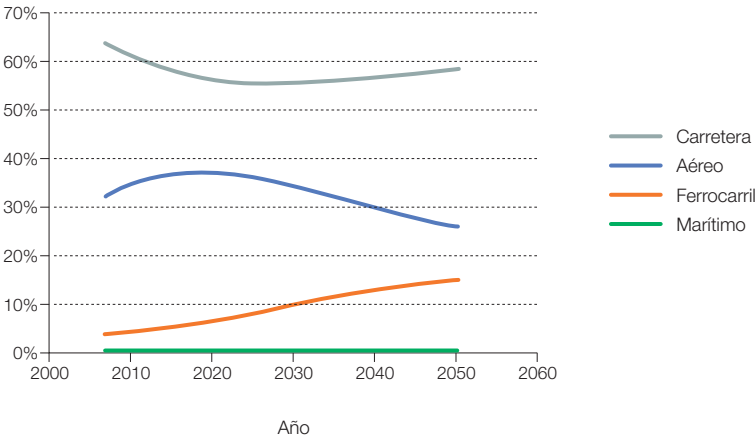


Figura 98. Peso modal de la movilidad interurbana de viajeros en escenario E3.0.



Por lo que respecta al ferrocarril su infrautilización está asociada tanto al bajo factor de capacidad como al uso poco eficiente del conjunto de la red disponible. Tanto para la carretera como para el ferrocarril el STI proporciona las herramientas para mejorar sensiblemente estos factores de ineficiencia.

También es preciso diferenciar la participación de los autocares en la cobertura de la demanda de movilidad por carretera, debido al diferente consumo específico respecto a los coches/motos. En la figura 101 recogemos el escenario correspondiente. En principio, esta diferenciación es más relevante en el contexto

Figura 99. Participación modal en la movilidad interurbana absoluta peninsular de viajeros en el escenario BAU.

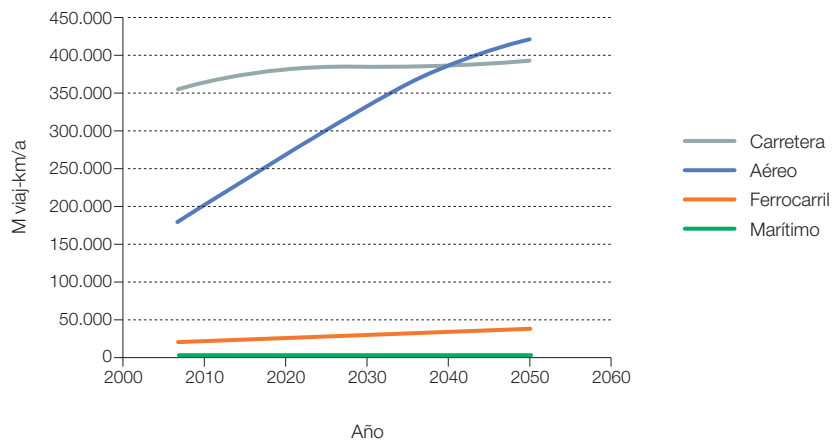
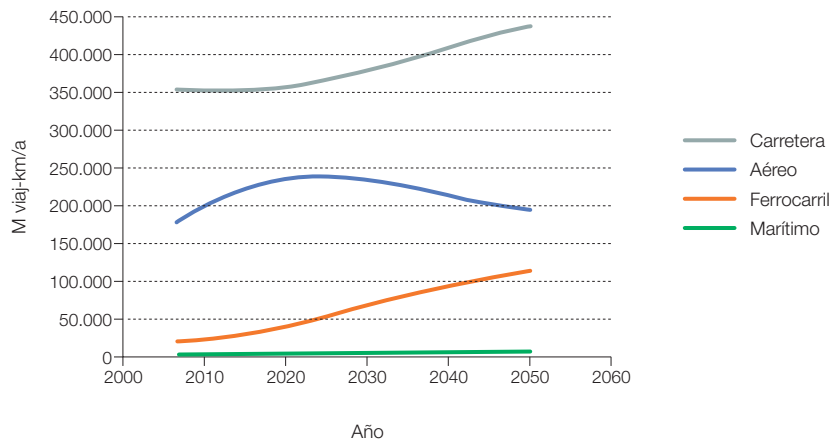


Figura 100. Participación modal en la movilidad interurbana absoluta peninsular de viajeros en el escenario E3.0.



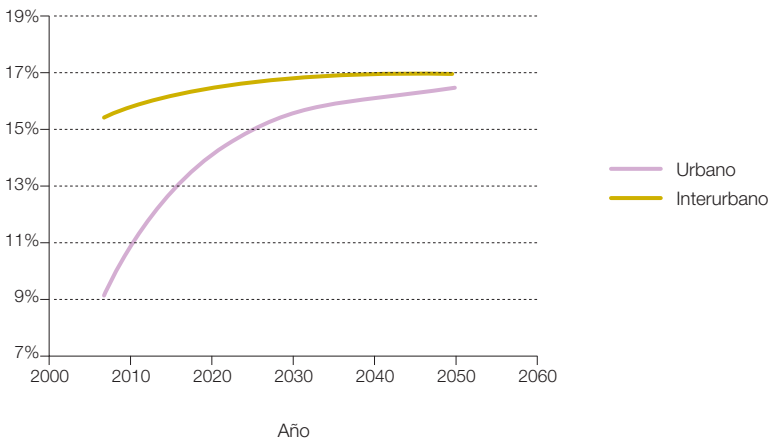
BAU, que es donde existe una mayor diferencia entre el consumo específico de coches y autocares. En efecto, en el E3.0, el STI acomoda los tamaños de los vehículos a la demanda de movilidad para alcanzar, en todos los casos, elevados factores de capacidad, empleando además vehículos principalmente eléctricos, de tal forma que las diferencias en consumo específico son menores.

Por último, también merece mención explícita la diferenciación dentro del modo carretera de los dos factores carretera particular y carretera colectivo, tal y como hicimos en el caso de la movilidad urbana. Para el caso de la movilidad interurbana el resultado que presentamos es el agregado de los dos submodos, que ya lleva implícita una fuerte transición del modo particular hacia el colectivo en el marco de un STI, dónde el término colectivo debe interpretarse de forma amplia, que abarque tanto esas situaciones en que la operación del vehículo está gobernada por el STI, como por aquellas en que la propiedad del vehículo es la que tiene el atributo de colectivo (transporte

público), dominando probablemente esta segunda acepción del término colectivo durante los primeros años del escenario.

En efecto, en el campo del transporte no urbano por carretera es dónde más rápido²⁸⁰ perdería sentido la propiedad particular de los vehículos, al desarrollarse un STI y un sistema económico inteligente en el que se apoye la transición del sector transporte hacia la sostenibilidad. La rigidez que supone la posesión de un vehículo particular para cubrir los requerimientos de movilidad interurbana, así como sus costes, permitirían en un contexto E3.0 una rápida transición en primera instancia hacia la situación en que el vehículo deja de ser de propiedad particular, de tal forma que se posibilita adaptar las características del vehículo a los requerimientos de cada demanda de movilidad sin las ataduras y rigideces asociadas a la posesión de un vehículo propio, y en segunda instancia a la evolución hacia la adquisición de servicios de movilidad que aumentan todavía más la flexibilidad.

Figura 101. Participación de los autocares/autobuses en la cobertura de la demanda de movilidad por carretera en el escenario BAU.



280 En el caso de la movilidad urbana por carretera, el vehículo particular puede estar mucho mejor adaptado al requerimiento de movilidad para el que se usa, por lo que cabe prever que se pueda prolongar más la posesión particular del vehículo. Además, debido a la mayor ineficiencia energética en comparación con el modo carretera colectivo, es más relevante mantener por separado ambos submodos desde la perspectiva de elaboración de escenarios.

Ya en la actualidad estamos asistiendo al despegue de iniciativas en la dirección de la primera acepción de colectividad en el transporte por carretera²⁸¹, que además actúan como facilitadoras a la introducción del vector electricidad en el transporte por carretera. Y a medida que vaya pasando el tiempo y vaya desarrollándose la incorporación de la inteligencia en el sistema de transporte, la tendencia de evolución previsible en esta dirección es a la progresión del alcance colectivo desde la propiedad del vehículo hasta el servicio completo de movilidad²⁸².

3.6.2.6 Escenarios de reparto modal en movilidad no urbana de mercancías

Pasamos a continuación a presentar los escenarios BAU y E3.0 adoptados para el transporte interurbano de mercancías. En primer lugar, resulta conveniente recordar una vez más que los escenarios desarrollados en este estudio incorporan el 50% de transporte internacional, motivo por el cual los porcentajes de peso modal no coinciden²⁸³ con los de muchas referencias que se limitan al transporte interior.

En las figuras 102 a 106 presentamos para cada uno de los modos considerados, la evolución histórica del peso modal y los correspondientes escenarios BAU y E3.0.

Por lo que se refiere al transporte de mercancías por tubería, planteamos para el contexto BAU un escenario tendencial mediante el ajuste exponencial de los valores históricos. Para el caso E3.0, por un lado cabría esperar una reducción más fuerte de la participación de este modo debido a la desaparición de los combustibles fósiles²⁸⁴, pero por otro lado cabría plantearse que en el contexto E3.0 quedarían otros elementos susceptibles de ser

transportados por tubería (gas de síntesis producto de la gasificación de la biomasa, biocombustibles líquidos, hidrógeno generado con renovables, etc.). Sin embargo, finalmente adoptamos para el contexto E3.0 el mismo escenario que para el contexto BAU por los siguientes motivos:

- La tendencia de crecimiento de la demanda de movilidad por los otros modos.
- Se intenta reducir en este estudio las aplicaciones cubiertas con biocombustibles e hidrógeno por motivos de escasez de recurso y de eficiencia.
- En cualquier caso representa una pequeña fracción de la demanda de movilidad de mercancías.

Para el caso del transporte aéreo de mercancías, en el contexto BAU planteamos un escenario de estabilización de su peso modal en un valor cercano a los actuales y al promedio histórico. En el contexto E3.0 planteamos un escenario con una mayor reducción, que a pesar de todo conduce a un valor final de movilidad absoluta de mercancías por avión ligeramente superior al actual. De cualquier forma, el transporte de mercancías por avión también constituye una fracción muy pequeña de la demanda total de movilidad de mercancías.

En el caso del transporte de mercancías por ferrocarril es donde encontramos la primera diferenciación importante entre los contextos BAU y E3.0.

En el contexto BAU, para la movilidad de mercancías por ferrocarril consideramos un escenario ligeramente más favorable que la tendencia histórica exponencial, que conduciría prácticamente a una eliminación de la

²⁸¹ Iniciativas como la oferta de servicios de movilidad Mu by Peugeot, en cierta medida, los de car-sharing van completamente en esta línea de desprender a los usuarios de los vehículos de la rigidez y servidumbre asociada a la posesión particular de un vehículo, permitiendo además reducir de forma significativa la inversión energética asociada a la fabricación de vehículos. Otras iniciativas como las que Better Place está desplegando en distintos países para la introducción del vehículo eléctrico, también van parcialmente en esta dirección, al hacer que el componente más caro del vehículo eléctrico deje de ser de propiedad particular.

²⁸² Sin embargo, el potencial de la aplicación de la inteligencia en la optimización de la operación del transporte por carretera probablemente sea más limitado en el caso de los desplazamientos interurbanos que en los urbanos, por ser en estos últimos donde se concentran las situaciones de congestión asociadas a un uso ineficiente de la infraestructura de transporte por carretera.

²⁸³ En nuestro caso encontramos un mayor peso de los modos marítimo y aire, y un menor peso del modo carretera, debido a que el transporte internacional es donde los modos marítimo y aire encuentran su mayor aplicación.

²⁸⁴ Actualmente, el transporte por tubería se emplea exclusivamente para el transporte de combustibles fósiles líquidos y gaseosos. Es posible plantearse el transporte por tubería de otros tipos de mercancía, pero tal y como veremos en el punto siguiente la eficiencia de este modo de transporte a igualdad de velocidades es considerablemente inferior a la de otros modos.

participación de este modo para la cobertura de la demanda de movilidad de mercancías.

En el caso del contexto E3.0, para la movilidad de mercancías por ferrocarril planteamos un fuerte incremento como sustituto del transporte por carretera. Este cambio modal, en parte viene facilitado por el enfoque intermodal coordinado del STI²⁸⁵, y conduce a que este modo alcance al final del escenario un peso relativo considerablemente superior al histórico, y valores absolutos de movilidad muy superiores. De hecho, el cambio planteado para el ferrocarril podría verse como muy radical, pero viene impulsado por la necesidad de absorber una parte importante de la movilidad por carretera, que en principio puede resultar más problemática de electrificar por completo²⁸⁶.

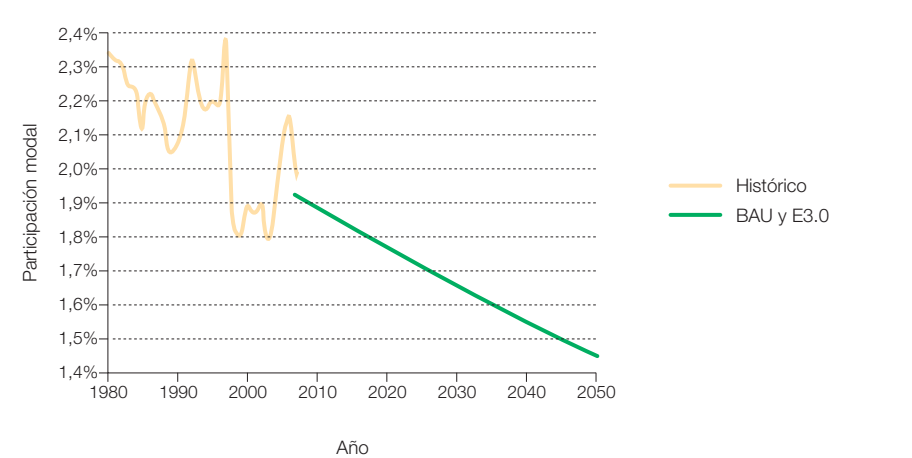
Pero para el transporte de mercancías, la opción de camiones eléctricos con reposición de baterías en destino final y por una red de electrolineras distribuidas por las rutas principales

también puede resultar adecuada²⁸⁷. En estas condiciones, y con elevados factores de capacidad potenciados por el STI, los camiones eléctricos podrían incluso ser más eficientes que el tren. Pero cabe esperar un retraso en la introducción del camión eléctrico a gran escala, por lo que este déficit de electrificación del modo carretera se puede cubrir con un mayor ritmo de crecimiento de la participación modal del tren.

Por lo que respecta al transporte marítimo de mercancías, en el contexto BAU suponemos una tendencia a la estabilización hacia el mayor valor histórico. En el contexto E3.0 plantemos tan solo un ligero incremento de la participación modal. No creemos que sea justificable plantear escenarios de mayores incrementos del peso modal del transporte marítimo debido a que:

- Su participación modal ya parte de un valor muy elevado y está dominada por las importaciones del exterior.

Figura 102. Peso modal de la movilidad interurbana de mercancías por tubería. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.



285 Incluyendo un sistema logístico inteligente.

286 En principio, solo una pequeña parte el transporte de mercancías interurbano por carretera es fácilmente electrificable (el del entorno de los núcleos urbanos, que incluye al intermodal para conectar con el ferrocarril) para acceder al conjunto de los recursos renovable con rendimientos elevados. El resto, en principio deberá ser cubierto con biocombustibles (limitaciones disponibilidad recurso) e hidrógeno (penalización energética). Pero también existe la opción de desplegar una gran infraestructura de electrolineras para reponer y recargar las baterías de los camiones pesados, que a priori puede parecer una opción más difícil de implementar, pero realmente no queda tan alejada de los planteamientos actuales, en un contexto donde el volumen de movilidad de mercancías por carretera se reduzca significativamente.

287 Tanto desde el punto de vista de eficiencia energética como desde el punto de vista de integración del sistema energético, pues los centros de recarga de las baterías de los camiones podrían proporcionar una contribución importante a la regulación del sistema eléctrico, tanto por su capacidad de acumulación distribuida como por el potencial de GDE.

- La configuración de España (península) hace que la mayoría de la movilidad de mercancías que venga de fuera ya lo haga actualmente por barco (a diferencia de otros países).
- Podríamos plantear un ligero incremento en la movilidad interurbana nacional por barco, pero no parece que puedan llegar a ser grandes cantidades²⁸⁸.

Figura 103. Peso modal de la movilidad interurbana de mercancías por avión. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.

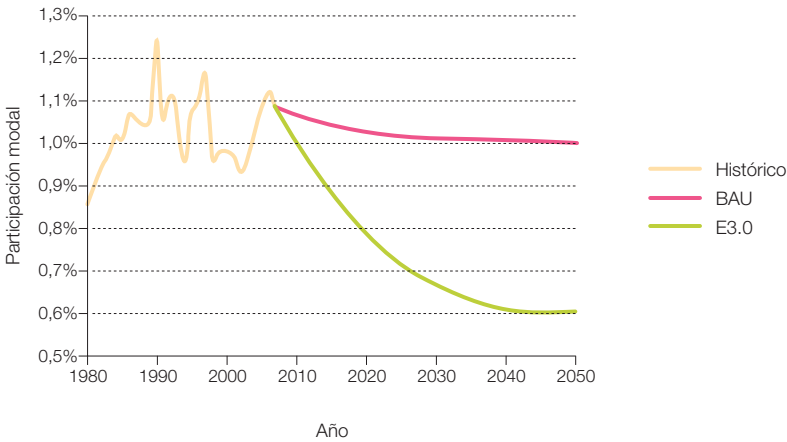
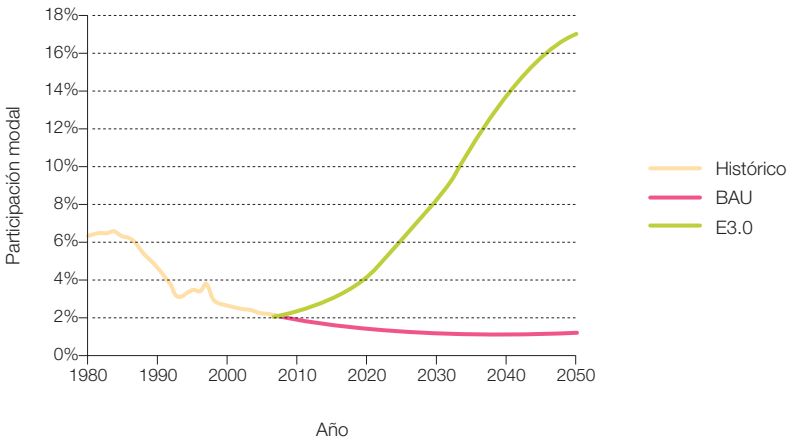


Figura 104. Peso modal de la movilidad interurbana de mercancías por ferrocarril. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.



²⁸⁸ En efecto, solo tendría sentido entre ciudades costeras y a menudo a costa de mayores recorridos, por lo que se pierde el efecto de la eficiencia adicional del barco en las mayores distancias. Con un sistema logístico inteligente que permita operar el transporte de carretera a elevados factores de capacidad, el margen de mejora asociado a los barcos de cabotaje no es tan elevado como para justificar el intento de forzar este modo.

Por lo que respecta al transporte de mercancías por carretera, en el contexto BAU planteamos un escenario tendencial, sin embargo aplicamos tasas de crecimiento decrecientes a lo largo del periodo considerado, de tal forma que el peso modal del transporte de mercancías por carretera tiende a estabilizarse

con valores del orden del 78% al final del escenario considerado. Por lo que respecta al contexto E3.0, planteamos un escenario que alcanza su máxima participación modal en torno a la actualidad, para posteriormente evolucionar con tasas decrecientes²⁸⁹ a un mayor ritmo al principio, por forzar el cambio modal

Figura 105. Peso modal de la movilidad interurbana de mercancías por barco. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.

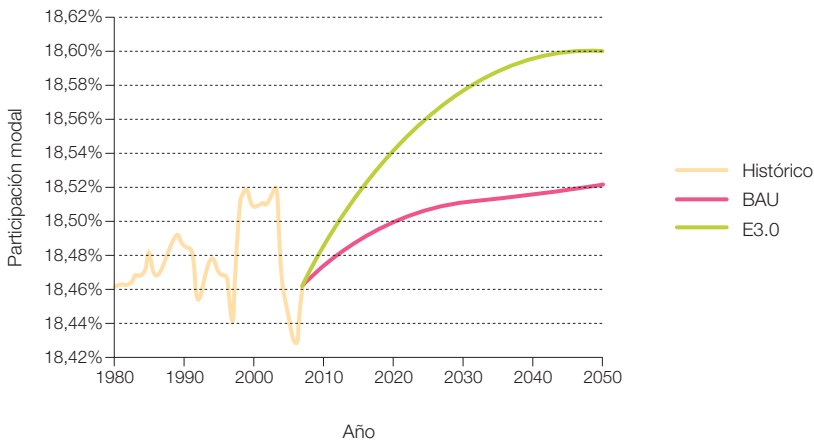
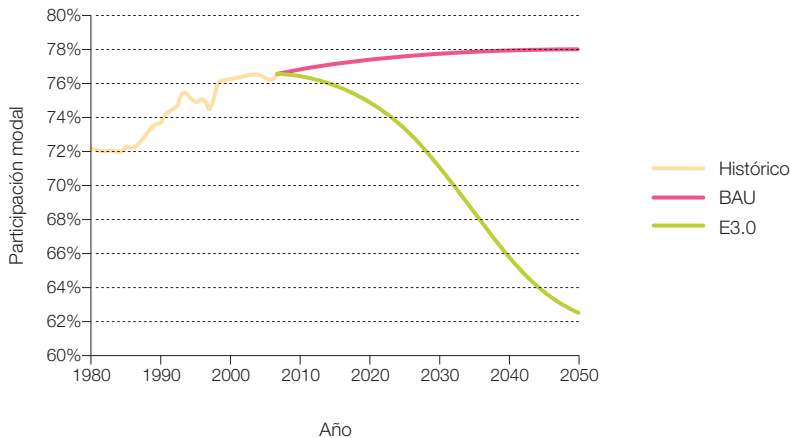


Figura 106. Peso modal de la movilidad interurbana de mercancías por carretera. Evolución histórica y escenarios BAU y E3.0.



289 Planteamos esta tendencia decreciente a pesar de la gran eficiencia del camión eléctrico, por considerar que cabe esperar que se retrase su desarrollo y el STI saque el máximo provecho del ferrocarril.

hacia el ferrocarril, para reducirse posteriormente el ritmo de decrecimiento a medida que empiecen a introducirse los camiones eléctricos para transporte de mercancías.

En las figuras 107 y 108 recogemos la evolución del reparto modal de los distintos modos

para la movilidad no urbana de mercancías en los contextos BAU y E3.0. Como podemos observar, tanto en BAU como en E3.0 el modo carretera sigue dominando a los demás modos para el transporte de mercancías. La diferencia entre ambos contextos es que en el contexto E3.0 se inicia una transición modal

Figura 107. Escenario evolución modal del transporte de mercancías no urbano en el contexto BAU.

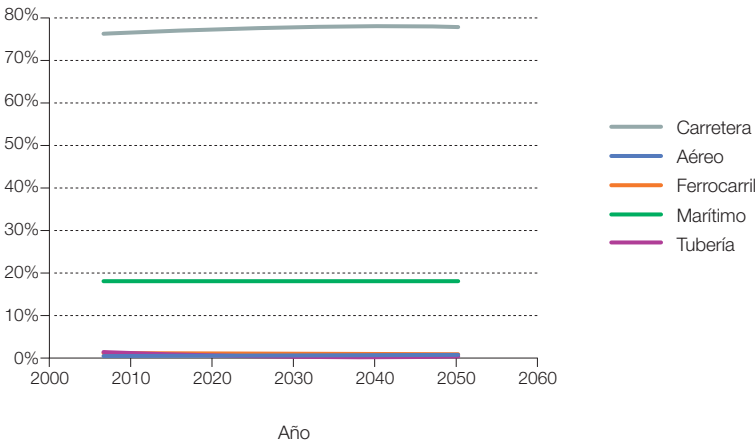
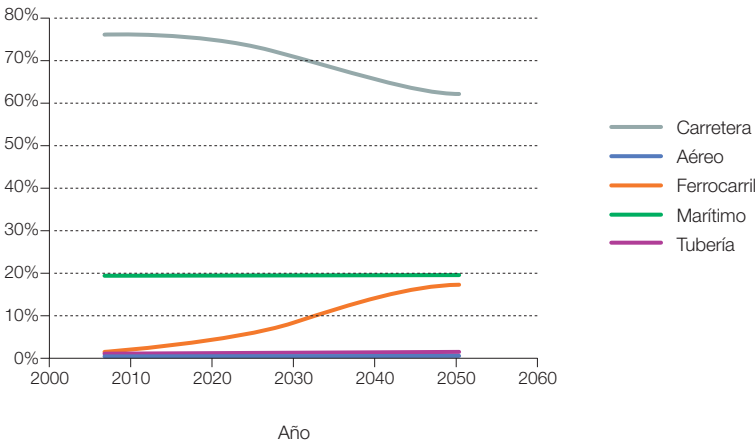


Figura 108. Escenario evolución modal del transporte de mercancías no urbano en el contexto E3.0.



de la carretera hacia el ferrocarril impulsada por el STI, y el sistema logístico inteligente para sacar el máximo provecho de la red ferroviaria actual, y de la mayor eficiencia del modo ferrocarril respecto al modo carretera alimentado por combustibles. Con el tiempo, la opción del camión eléctrico va extendiéndose,

con su mayor flexibilidad y una eficiencia muy cercana a la del modo ferroviario, y la red ferroviaria va saturándose, por lo que la tendencia en E3.0 es a la estabilización de los modos carretera y ferrocarril en unos valores asintóticos más cercanos, pero todavía claramente dominados por el modo carretera.

Figura 109. Escenario evolución movilidad absoluta modal del transporte de mercancías no urbano en el contexto BAU: Todos los modos.

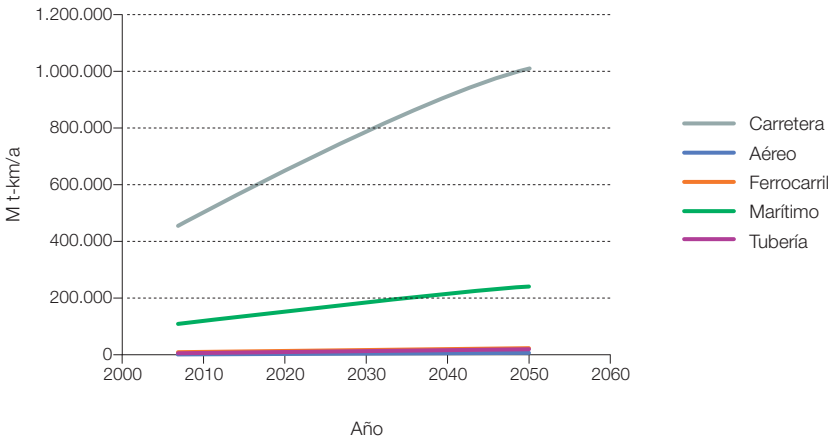


Figura 110. Escenario evolución movilidad absoluta modal del transporte de mercancías no urbano en el contexto BAU: Excluyendo modos dominantes de carretera y barco.

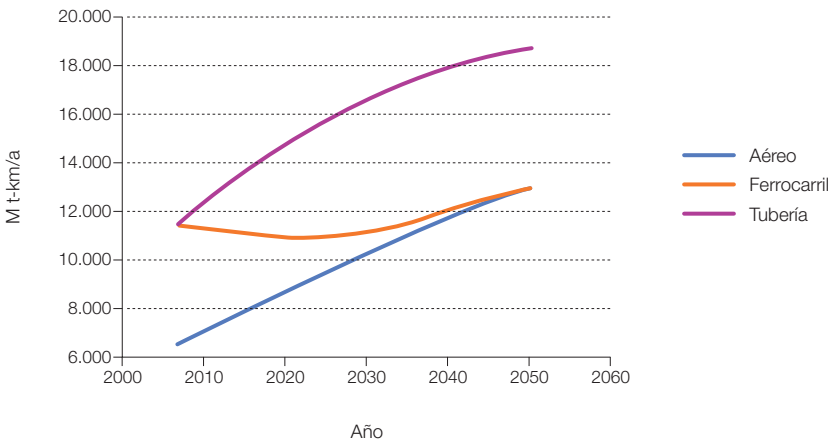
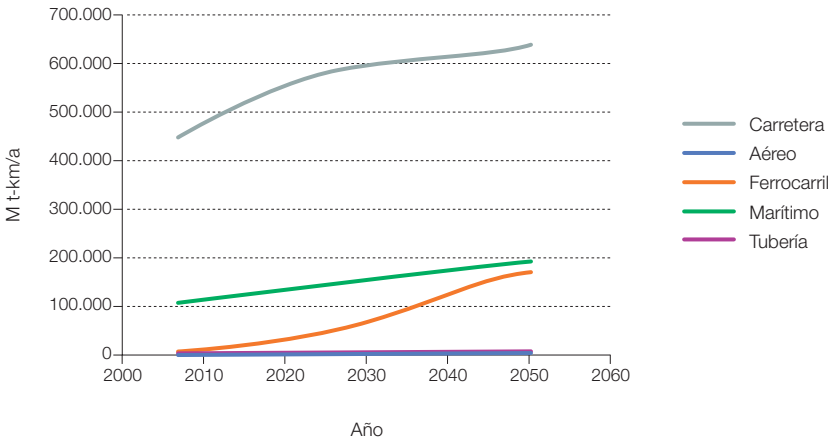


Figura 111. Escenario evolución movilidad absoluta modal del transporte de mercancías no urbano en el contexto E3.0.



Finalmente, por lo que respecta a los valores de movilidad absoluta cubierta por los distintos modos de transporte de mercancía no urbana, las figuras 109 a 111 nos muestran su evolución para los contextos BAU y E3.0 a lo largo del escenario temporal considerado.

3.6.3 Escenarios de consumo específico modal

En este punto vamos a recoger los escenarios de evolución del consumo específico para los distintos modos de transporte de viajeros y mercancías. El consumo específico modal incluye los efectos del consumo específico de los vehículos empleados y los del factor de capacidad (CF) con el que se emplean estos vehículos. El consumo específico de los vehículos viene afectado por las mejoras y/o cambios tecnológicos²⁹⁰, mientras que el CF se ve especialmente afectado por la introducción de inteligencia en el sistema de transporte.

Uno de los elementos fundamentales que nos permite alcanzar una gran reducción de la

demanda energética en el contexto E3.0 respecto al contexto BAU, más allá de las reducciones alcanzadas sobre la propia demanda de movilidad por otros medios²⁹¹, es la introducción de inteligencia en el sector transporte. En efecto, el STI permite sacar un rendimiento muy superior a las infraestructuras existentes, y elimina de raíz el origen de los impactos negativos del sector transporte sobre la economía, las personas, y el entorno (congestiones, contaminación, accidentes, etc.).

Para conseguir desplegar el máximo potencial del STI es preciso que se articule mediante mecanismos de mercado asociados a una economía energética basada en prestaciones. Es decir, es menester que tenga lugar una reestructuración económica del sector transporte para que el origen de los beneficios obtenidos pase de ser el número de vehículos vendidos, a ser la cobertura de la demanda de servicio de movilidad con el mínimo consumo energético y la máxima comodidad para los usuarios. Esta es realmente una reestructuración profunda, pero podría

²⁹⁰ Por ejemplo, el paso de los vehículos con motor de combustión interna (MCI) a vehículos eléctricos.

²⁹¹ Como por ejemplo, la desmaterialización de la economía facilitando el teletrabajo, las teleconferencias, el e-learning, etc.

introducir los cambios en escalón que necesitamos para que el sector transporte evolucione hacia la sostenibilidad en los cortos plazos de tiempo de que disponemos. En (García Casals X., 2009) se encuentra un ejemplo de un modelo de negocio que permitiría iniciar esta transición en el sector transporte.

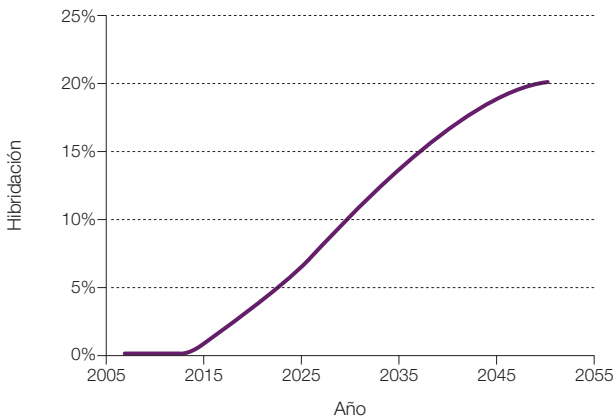
3.6.3.1 Escenarios de transporte en coches

El coche se percibe probablemente como el mayor responsable de la falta de sostenibilidad actual en el sector transporte: consumo energético disparatado, gran dependencia de los combustibles fósiles, muy baja eficiencia para la cobertura de la demanda de movilidad, congestiones exageradas, gran número de accidentes, etc. Por ello existe la tendencia a señalarle como culpable y buscar escenarios en los que su participación en la cobertura de la demanda de movilidad se vea reducida al máximo posible. Sin embargo, en el contexto actual las implicaciones del coche van mucho

más allá de sus repercusiones energéticas, y se ha arraigado en la estructura de nuestros modelos cultural y económico, por lo que realmente resulta difícil evolucionar hacia un escenario en que su papel predominante se vea reducido de forma significativa²⁹².

Pero realmente no es el coche el culpable ni el responsable de la situación actual del sector transporte, sino el uso que de este medio de transporte estamos haciendo, y los mecanismos de mercado con los que le hemos introducido²⁹³. En efecto, en el contexto de un STI y con unos mecanismos económicos en los que el beneficio quede directamente vinculado al ahorro y la eficiencia, el coche probablemente seguiría siendo uno de los elementos principales del sistema de transporte. Con una motorización eléctrica y operado con elevados factores de capacidad, añade a su elevada elasticidad unos consumos específicos del orden de los que podamos alcanzar con los medios de transporte más eficientes, pero mucho más inelásticos, y además proporciona herramientas muy valiosas para regular un sistema energético integrado.

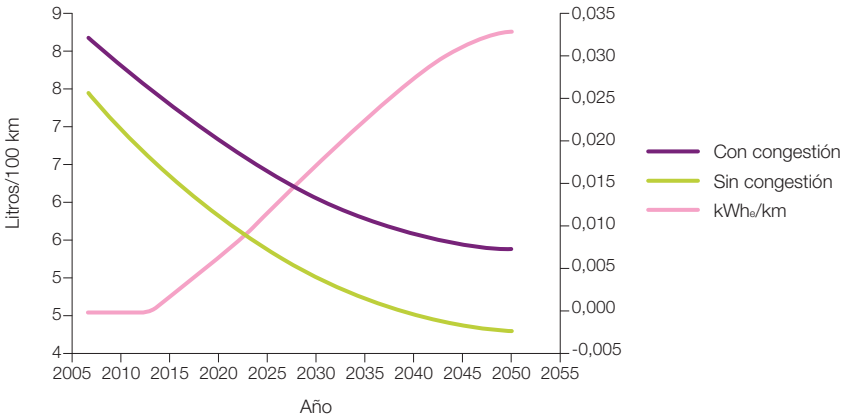
Figura 112. Escenario de hibridación del parque de coches en el contexto BAU.



²⁹² A nivel del modelo económico, resulta ilustrativa la experiencia del año 2009. En medio de una situación de crisis económica, asociada entre otros a un modelo económico que promueve el despilfarro energético, las actuaciones del Gobierno para resolver la crisis van directamente encaminadas a mantener el modelo económico establecido promoviendo que se sigan comprando coches mediante la subvención de los mismos, en lugar de dirigir los esfuerzos políticos a reestructurar el modelo productivo para que su "salud" no esté directamente relacionada con el despilfarro.

²⁹³ Adicionalmente, el extenso uso que hasta ahora hemos hecho del coche como medio de transporte ha conducido a la creación de una ingente infraestructura de movilidad que deberíamos aprovechar y optimizar bajo el supuesto de introducción de eficiencia en este medio de transporte.

Figura 113. Consumo de combustible, en términos de litros de gasolina equivalente, del parque de coches en el escenario BAU, en condiciones de operación ideal (sin congestión) y en condiciones de operación real (con congestión). En el eje de la derecha recogemos el consumo de electricidad asociado a la hibridación de los coches BAU (promedio parque de vehículos) en condiciones de operación real.



Para el escenario BAU supondremos que la eficiencia energética media del parque de vehículos mejora significativamente a lo largo de todo el escenario, con una hibridación²⁹⁴ creciente que llega a alcanzar el 20% en el año 2050 (ver figura 112), lo que da lugar a una reducción muy importante del consumo de combustible líquido a lo largo del escenario. Sin embargo, la ausencia de implementación de un STI hace que los problemas de congestión se vayan agudizando, con el consiguiente incremento del consumo efectivo de los coches²⁹⁵. En la figura 113 mostramos la evolución del consumo de combustible líquido (en términos de litros equivalentes de gasolina) del parque de coches BAU en operación ideal (sin congestión) y en operación real (con congestión), así como el consumo de electricidad asociado a la hibridación del parque de coches BAU.

Para el escenario de tecnología E3.0 asumimos una electrificación total²⁹⁶ del parque de

coches. Partiendo de una situación inicial con el consumo de los coches eléctricos que ahora están saliendo al mercado, planteamos un escenario de gasto energético de los vehículos inicialmente creciente²⁹⁷, al ir aumentando el tamaño y prestaciones de los vehículos, que posteriormente se estabiliza y empieza a reducirse al ir introduciendo mejoras de eficiencia, tanto en el diseño de los vehículos como en su operación. En la figura 114 mostramos la evolución del consumo específico de los coches, por vehículo medio del parque, para los escenarios BAU y E3.0. Como podemos ver, la electrificación de los coches en el planteamiento E3.0, a pesar de haber introducido un planteamiento conservador de incremento significativo en los primeros años, conduce a una estructura de consumo mucho más favorable que el BAU progresista que hemos supuesto.

El siguiente aspecto a considerar es cómo se usan esos coches, que una vez establecido el

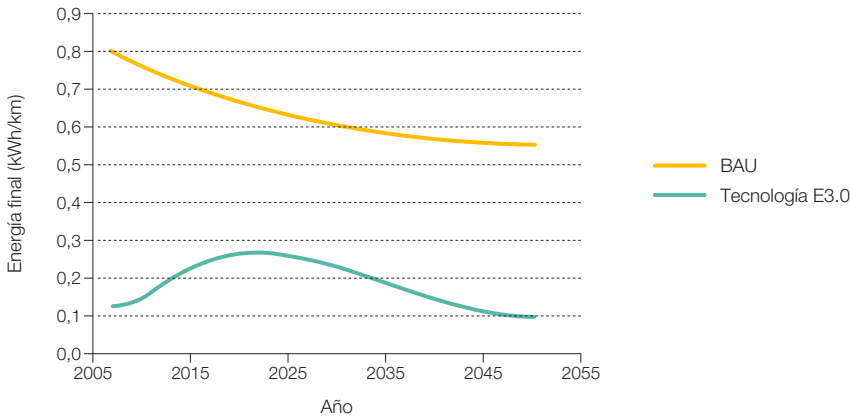
294 Aquí definimos la hibridación como el porcentaje del consumo fósil que es sustituido por electricidad, y se refiere al promedio del parque de coches.

295 También hemos supuesto un incremento de un 10% de consumo energético para la conducción urbana.

296 Este planteamiento puede sonar, a priori, muy radical, por parecer irreal que de la noche a la mañana se pueda reconvertir el parque de coches de un parque basado en el MCI a uno totalmente electrificado. Este es un cambio en escalón que por necesario que sea, a priori puede antojarse como excesivamente brusco para tener algún viso de realidad. Y en efecto así es, pero es preciso tener en cuenta dos aspectos: en primer lugar, el escenario planteado como tecnología E3.0 no corresponde a los escenarios de transición, sino que representan la situación que cada año nos ofrece la tecnología E3.0 (en este caso el vehículo eléctrico). Posteriormente ya aplicaremos diversos escenarios de transición para pasar del contexto BAU al contexto E3.0. En segundo lugar, la modificación de la estructura económica del sector transporte, con un STI basado en la prestación de servicios de movilidad en lugar de en la venta de unidades de coches, tiene capacidad de introducir cambios en escalón que van mucho más allá de lo que nos permite planteamos la mentalidad BAU, por lo que la transición desde el contexto BAU al E3.0 podría ser mucho más rápida de lo que nos refleja la experiencia pasada, en la que, por lo general, no se activaban cambios estructurales en los sistemas en que estamos organizados.

297 Es preciso recalcar que estos escenarios podrían considerarse como demasiado progresista para el enfoque BAU, y probablemente excesivamente conservadores para el escenario E3.0.

Figura 114. Escenarios de evolución del consumo específico total de energía final (electricidad y combustible) de un coche medio representativo del parque de coches en los escenarios BAU y E3.0.



consumo energético del vehículo en condiciones de operación, básicamente se limita a cuál es la ocupación con la que se usan los coches, es decir, su factor de capacidad (CF), y es precisamente aquí donde el planteamiento de un STI introduce unas grandes diferencias entre los contextos BAU y E3.0.

Para el contexto BAU suponemos que la tendencia se mantiene parecida a la actual. La referencia es que en 2001 teníamos 1,87 viajeros/coche de media, y en 2007 había descendido a 1,74 viajeros/coche (Ministerio de Fomento, 2007), empeorando por tanto el factor de capacidad con el que se usa el coche. Las políticas BAU para introducir mejoras en la dirección requerida por el cambio climático, pero con alcance insuficiente, pueden intentar mejorar un poco el factor de capacidad con el que se usa el coche, pero la tendencia fundamental seguirá siendo la del uso individual del vehículo porque el sistema económico y político no va a ofrecer alternativas²⁹⁸ a los demandantes del servicio de movilidad, lo cual va a contrarrestar en gran medida aquellas políticas

tendientes a mejorar el CF. En estas condiciones planteamos un escenario optimista para la evolución del CF en el contexto BAU, en el que se consigue invertir la tendencia histórica a la reducción del CF durante los próximos años, para posteriormente pasar a adquirir tasas crecientes del CF hasta el final del escenario.

En el contexto E3.0, la implementación de un STI permite aumentar de forma muy significativa el CF con el que se usa el coche. En este contexto el coche va evolucionando progresivamente hacia una situación de servicio colectivo desde su condición actual de servicio particular. En estas condiciones, los coches, mayoritariamente por lo que respecta a la cobertura de la demanda de movilidad, ya no son propiedad del demandante del servicio de movilidad, sino de una empresa (pública o privada) de prestación de servicios de movilidad. Este planteamiento no implica que dejen de tenerse coches en propiedad particular²⁹⁹, pero sí el que estos dejen de emplearse para cubrir una porción significativa de la demanda de movilidad³⁰⁰.

298 Introducir alternativas que permitan un cambio radical de las tendencias básicas requiere de la aplicación de inteligencia a estos sistemas, lo cual no entra dentro del contexto BAU.

299 Hay elementos culturales muy arraigados relacionados con la propiedad particular de los coches, y no hay necesidad de hacer depender la transición del sistema de transporte de la superación de estos aspectos culturales, pues sus plazos de respuesta son más dilatados de los necesarios y disponibles para reconvertir el sistema de transporte hacia la sostenibilidad.

300 Es decir, los demandantes del servicio de movilidad probablemente sigan teniendo un coche en propiedad particular durante algunos años, pero a la hora de cubrir su demanda de servicios de movilidad, les resultará mucho más ventajoso contratar esos servicios de la empresa de prestación de servicios de movilidad bajo el contexto de un STI, que el cubrirlos con su propio coche. En efecto, a nivel económico les resultará mucho más favorable contratar el servicio de movilidad (ver estudio de modelo de negocio en anexo para contrastar la magnitud del potencial de ahorro), y a nivel operativo también son múltiples las ventajas que les puede ofrecer la empresa de servicios de movilidad (comodidad, seguridad, rapidez, etc.) al tener acceso a todos los beneficios del STI. Con el tiempo, si las empresas de servicios de movilidad evolucionan suficientemente, estos elementos harán que se vaya superando la necesidad de la propiedad particular del coche, accediendo al potencial de optimización de recursos que permite el enfoque E3.0 (no necesidad de aparcamiento, mantenimiento, actualización del vehículo particular).

Figura 115. Escenarios de evolución del factor de capacidad del parque de coches en los escenarios BAU y E3.0.

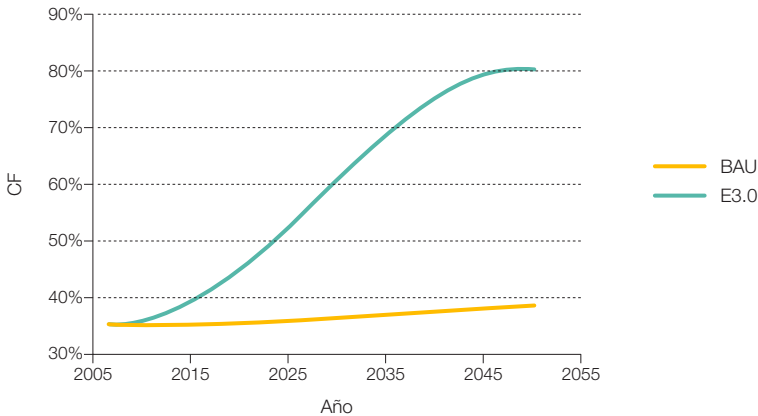
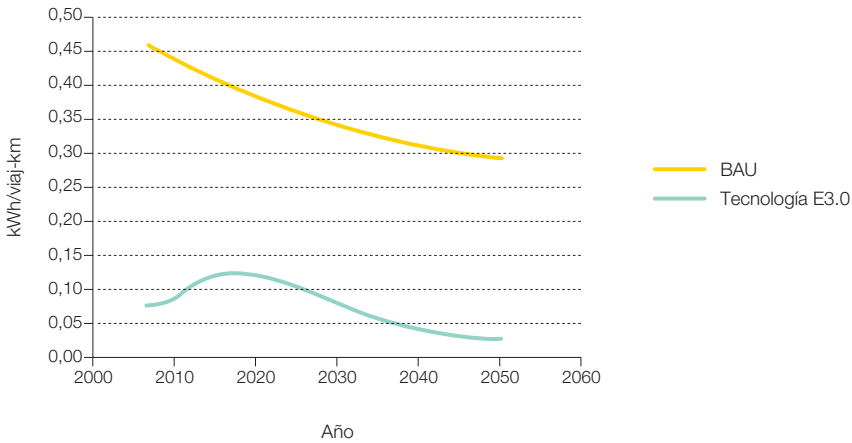


Figura 116. Escenarios de evolución del consumo específico por unidad de movilidad de los coches en los escenarios BAU y E3.0.



En estas condiciones, el escenario E3.0 llega a alcanzar valores del CF del orden de los actuales para la aviación, puesto que al igual que ésta se tratará de una flota optimizada que además adaptará el tipo de vehículo (tamaño) a las necesidades de cada servicio.

Algunas referencias (WBCSD, 2009) ya están planteando en la actualidad los denominados

*Cybernetic Transport Systems (CTS)*³⁰¹, lo cual permite aumentar el CF³⁰², y además mejoran la gestión del tráfico al poderse optimizar, así como la seguridad (no participación de las personas en la conducción).

En el contexto E3.0 limitamos el CF de los coches al final del escenario a valores del orden del 80% (cuatro de cinco plazas) por tratarse

³⁰¹ "Cybernetic transport systems", es decir, vehículos que se conducen automáticamente.
³⁰² Podría llegar hasta el 100% por no haber conductores; todos los ocupantes son pasajeros. Por el contrario, en motos, incluso con la conducción automática, es difícil que vaya al 100% de CF con el concepto actual de motocicleta por aspectos relacionados a las condiciones de uso. Pero si cabe la opción de que la motocicleta evolucione hacia un concepto de vehículo biplaza con dos compartimentos independientes.

de valores medios de toda la flota³⁰³ del STI. En la figura 115 presentamos los correspondientes escenarios de evolución del CF en los contextos BAU y E3.0.

De acuerdo con los escenarios de consumo específico de los vehículos y de sus CF ya es posible elaborar los escenarios de consumo específico por unidad de movilidad del modo de transporte considerado. En la figura 116 recogemos estos escenarios para los coches³⁰⁴, y en ella podemos apreciar el gran potencial que tiene el planteamiento de la tecnología E3.0 para reducir el consumo energético de este modo de transporte que, como vimos anteriormente, sigue siendo dominante en el contexto E3.0. Además de esta mayor eficiencia, la electrificación y concentración en compañías operadoras de servicios de movilidad, permite al contexto E3.0 ofrecer un gran potencial de contribución a la regulación del sistema energético integrado.

3.6.3.2 Escenarios de transporte en motos

Con frecuencia se escuchan voces proponiendo una transición modal de coche a moto como una medida de eficiencia energética. La lógica detrás de este planteamiento es el hecho de que el menor peso, tamaño y superficie de rodadura de una moto respecto a un coche debería proporcionar un importante margen de mejora de la eficiencia energética.

De hecho, exclusivamente desde el punto de utilización, en el contexto actual en el que un importante porcentaje de los coches van con un solo ocupante, el cambio modal hacia la moto permitiría pasar directamente de los CF del 35% a un CF del 50%, lo cual constituye una mejora muy significativa. Además, las motos están mucho menos sujetas

a las situaciones de congestión extrema a las que se encuentran sometidos los coches, especialmente en ambientes urbanos, y son mucho más sencillas de estacionar, ahorrando el correspondiente consumo de combustible.

Pero con todo, se debe tener precaución con este planteamiento, pues la triste realidad a día de hoy es que la regulación energética de las motos brilla por su ausencia, y no existe etiquetado ni objetivos de emisiones para estos vehículos, mientras que para los coches sí que existen. De hecho, los motores de muchas motos trabajan a revoluciones muy superiores a las de los coches, buscando con ello aumentar sus prestaciones, con lo que su eficiencia es significativamente inferior.

Por último, el pequeño tamaño y espacio disponible en las motos dificulta el planteamiento de hibridación (dotarla de dos motorizaciones) que sí que consideramos en el escenario BAU de los coches.

De acuerdo con esta situación, para el contexto BAU planteamos un escenario³⁰⁵ optimista con una sensible reducción en el consumo específico. Por lo que respecta al CF, en un contexto BAU consideramos que no hay opción de mejora respecto a la situación actual.

En el contexto E3.0 planteamos un escenario con motos eléctricas³⁰⁶, que podrían incluso llegar a tener una capacidad de conducción automática³⁰⁷ con el STI. Actualmente ya se han empezado a comercializar motos eléctricas en nuestro país, ver figura 117, aunque por ahora sus prestaciones las limitan exclusivamente al ámbito urbano. Al igual que en el caso de los coches eléctricos, planteamos un escenario conservador de consumos de las motos eléctricas en el que se contempla que,

303 Estos valores son del orden de los que actualmente ya se consiguen en los aviones, con una explotación de la flota parecida a la que se haría del parque de vehículos en el contexto de un STI.

304 Como podemos ver en la gráfica, se trata de un escenario de tecnología E3.0, al que posteriormente aplicaremos distintos escenarios de transición para evolucionar desde el contexto BAU al contexto E3.0.

305 No diferenciamos urbano e interurbano: la reducción de la cilindrada en urbano se compensa con el incremento de la congestión.

306 La bicicleta eléctrica, en este estudio, queda conceptualmente incorporada dentro de la moto eléctrica.

307 De hecho, en el contexto E3.0, el concepto de moto puede evolucionar hacia el de un vehículo monoplaza o biplaza autopilotado. El autopilotado permite, por un lado, optimizar la operación del vehículo disponiendo de mucha más información para su interacción inteligente con las infraestructuras de movilidad, así como desvincularla de las actuaciones humanas descoordinadas que son las que introducen el caos y la inseguridad en el sistema de transporte actual. Pero además, en el caso de mantener las dos plazas disponibles permite incrementar el factor de capacidad.

Figura 117. Ejemplo de moto eléctrica ya comercializada en España. Se trata del modelo VX-1 de Vectrix, con un motor de 21 kW y una velocidad punta de 100 km/h, implementando una batería con una capacidad de 3,7 kWh, lo que le confiere una autonomía entre 56 km y 89 km según las condiciones de conducción.



partiendo de los valores actuales habrá una primera etapa de crecimiento del consumo medio del parque asociada al incremento de prestaciones de las motos comercializadas, que a medida que pase el tiempo será contrarrestado por los incrementos de eficiencia en el diseño y la operación de estos vehículos.

En la figura 118 mostramos los escenarios de consumo específico por vehículo de las motos en los contextos BAU y tecnología E3.0. Como podemos apreciar, el margen de mejora asociada a la electrificación es muy importante, incluso superior al de los coches, dada la menor eficiencia de partida de los MCI de las motos.

Por lo que respecta a la ocupación, en la figura 119 mostramos los escenarios de evolución de los CF de las motos en los contextos BAU y E3.0³⁰⁸. Una vez más, el STI es el que marca las diferencias fundamentales por lo que a la ocupación de los vehículos respecta.

Según estos dos escenarios, podemos ya elaborar el escenario de consumos específicos por unidad de movilidad para las motos, que encontramos recogido en la figura 120. Como podemos ver, el potencial de mejora del contexto E3.0 respecto al BAU resulta también muy elevado para el caso de las motos.

Llegados a este punto, resulta interesante comparar desde el punto de vista del consumo energético los escenarios de coches y motos.

En la figura 121 podemos comparar los escenarios tecnología E3.0 de coches y motos por vehículo. Como podemos ver, excepto en torno al año 2010 en que ambos vehículos presentan un consumo del mismo orden de magnitud, en el resto del escenario el consumo del coche es sensiblemente superior al de la moto. Sin embargo, debido a la mayor capacidad de transporte del coche que de la moto, en la

³⁰⁸ En el caso del CF el escenario presentado ya incorpora el escenario de transición.

figura 122 podemos observar cómo los consumos específicos por unidad de movilidad de estos dos vehículos son muy parecidos. Este resultado refuerza el planteamiento del STI en el que se ajusta el tipo de vehículo a emplear, a la demanda de movilidad específica, y nos permitiría omitir la diferenciación entre coches y motos en el contexto E3.0.

Sin embargo, para el contexto BAU, tal y como nos muestra la figura 123, la moto resulta significativamente más ineficiente por unidad de movilidad que el coche. Este resultado es consecuencia de la dificultad de hibridación de la moto, la menor regulación energética que se aplica a las motos, y el menor potencial de mejora del CF para las motos.

Figura 118. Escenarios BAU y tecnología E3.0 de consumos específicos de las motos por vehículo representativo del parque.

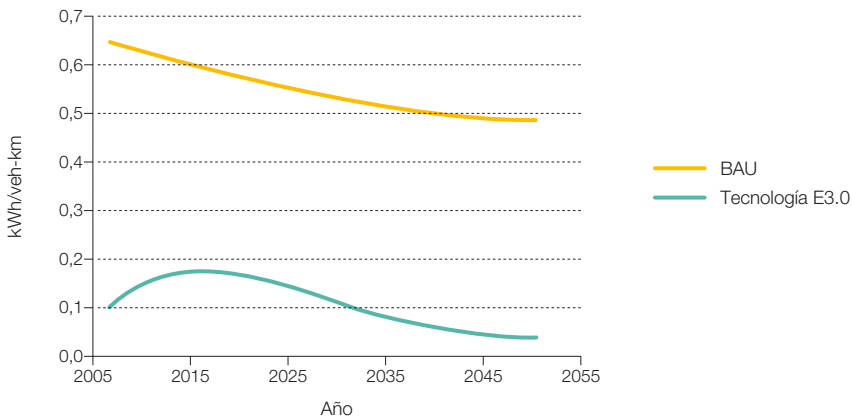


Figura 119. Escenarios BAU y E3.0 del factor de capacidad de las motos.

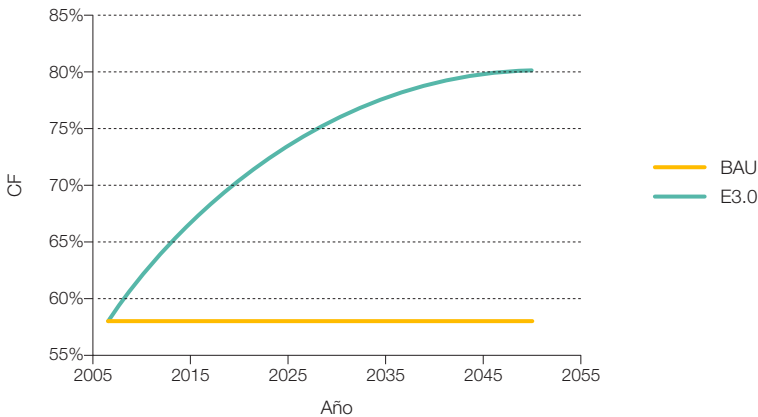


Figura 120. Escenarios BAU y E3.0 del consumo específico por unidad de movilidad de las motos.

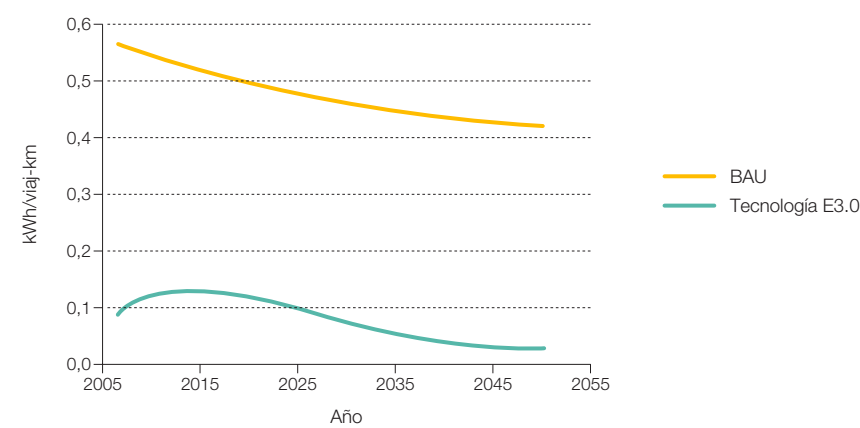


Figura 121. Comparativa de los escenarios de consumo específico por vehículo de los coches y motos de la tecnología E3.0.

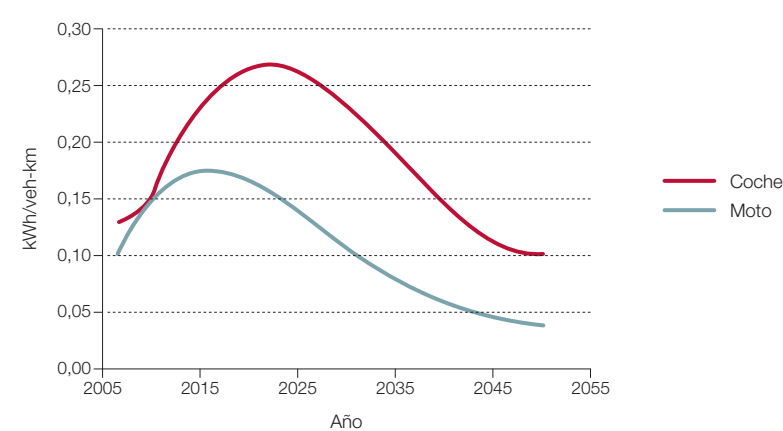


Figura 122. Comparativa de los escenarios de consumo específico por movilidad de los coches y motos en la tecnología E3.0.

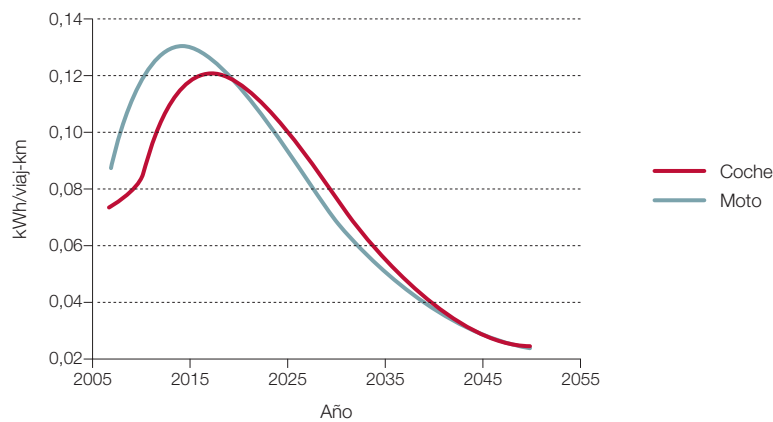
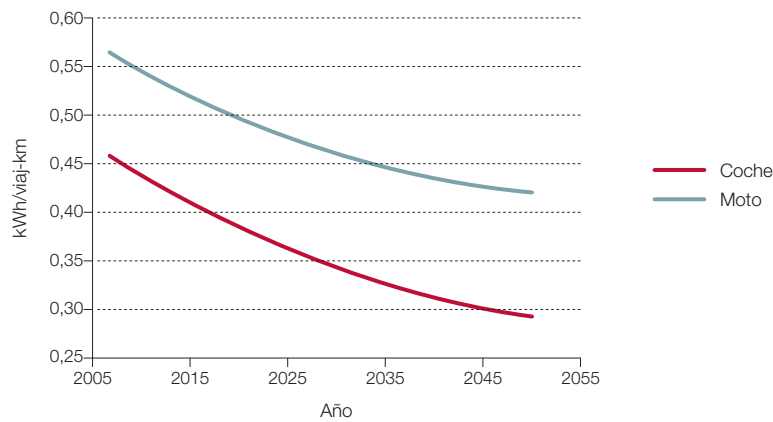


Figura 123. Comparativa de los escenarios de consumo específico por movilidad de los coches y motos en el contexto BAU.



3.6.3.3 Escenarios de transporte en autocar

En este punto presentamos los escenarios de consumo específico de los autocares (transporte de viajeros interurbano).

Para el contexto BAU partimos de los valores actuales del consumo específico y ocupación,

y suponemos una mejora en la eficiencia de los vehículos y de su CF³⁰⁹, pero no asumimos hibridación alguna, motivo por el cual la reducción de consumo es inferior a la que anteriormente planteamos para los coches en el contexto BAU.

El hecho de que dentro del contexto BAU asumamos una cierta hibridación de los

309 Como en otros casos, el supuesto que hacemos es relativamente optimista de acuerdo con lo que cabría esperar por la evolución histórica.

coches, y por el contrario no consideremos hibridación alguna en los autocares³¹⁰, tiene su justificación en el contexto en el que se desarrolla la comercialización de estos vehículos, en la estructura de los modelos de negocio establecidos, y en las aplicaciones a las que van orientados. En el caso de los coches, el mercado actual ya está ofreciendo vehículos híbridos, y los requerimientos de reducción de emisiones de CO₂ de este tipo de vehículos van a empujar hacia la hibridación progresiva, mientras no se abandone el motor de combustión interna (MCI). Gran parte de los desplazamientos que realizan los coches son en ambientes urbanos, por lo que la operación híbrida en estas condiciones de funcionamiento a baja velocidad resulta eficiente sin necesidad de incorporar grandes motorizaciones eléctricas. Por el contrario, el autocar se limita a desplazamientos interurbanos, y no existe por ahora ningún requerimiento de reducción de emisiones que apunte hacia la necesidad de la hibridación, así como tampoco hay vehículos híbridos en el mercado. El contexto económico bajo el que se desenvuelve la actividad de transporte BAU, parece difícil de justificar el gran incremento de inversión inicial asociado a la hibridación por el limitado beneficio que se obtendría de ella. Por el contrario, parece más plausible que en el caso de tener requerimientos de reducción de emisiones se evolucionara hacia el uso de biocombustibles.

Los autocares en la tecnología E3.0 los suponemos 100% eléctricos. Es un cambio radical, pero va buscando minimizar la necesidad de biocombustible líquido dada la escasez del recurso biomasa en nuestro país. Actualmente ya se comercializan bus eléctricos con 500 km de autonomía, y en las estaciones finales se puede proceder a un cambio completo de batería (sin esperar a recarga), por lo

que es un modelo de negocio que parece tan plausible o más que el planteado para la introducción de los coches eléctricos.

La mejora del CF en el contexto E3.0³¹¹ respecto al BAU es debida a que en un STI el tamaño de los autocares se ajusta mejor a la necesidad de movilidad, y su uso se limita a esas situaciones en las que resulta apropiado según la estructura de la demanda de movilidad para ese trayecto. Así como en el contexto BAU los autocares siguen circulando con CF muy bajos en algunos trayectos³¹², en el contexto E3.0, soportado por un STI, estas situaciones de ineficiencia extrema se eliminan, y se cubren esas demandas de movilidad con otros vehículos (coches, furgonetas, minibuses, etc.) usados con elevado CF.

En el caso de los autocares eléctricos de la tecnología E3.0, no suponemos un incremento tan grande de consumo como en los coches, pues aquí no va a haber tanta demanda de incrementar potencias y prestaciones. Partimos de unos consumos específicos ligeramente superiores a los de los productos actualmente disponibles en el mercado, asumimos un ligero incremento en los primeros años, y al final del escenario llegamos a un valor menor al inicial alcanzable por varios motivos: mejora en los rendimientos de los vehículos, evitar congestiones, etc.

Es de notar que en la tecnología E3.0 el autocar consume del orden de la mitad que el coche por unidad de movilidad, por lo que con esta gran variación, sí que tiene sentido mantener la diferenciación entre ambos modos. Sin embargo, la cobertura de demanda de movilidad que hacen los autocares es inferior a la que plantearíamos con un enfoque BAU, debido a que su uso se limita a esas situaciones en las que se puede alcanzar un elevado CF.

310 En el caso de los autobuses urbanos sí que supondremos una cierta hibridación del parque en el contexto BAU porque se dan condiciones diferenciales respecto a los autocares.

311 En el caso del CF ya se incluye el escenario de transición.

312 Por ejemplo, actualmente no es extraño encontrarse autocares de 65 plazas transportando un solo viajero a lo largo de un trayecto mucho más largo del necesario para ajustarse a un recorrido preestablecido sin considerar la demanda real de movilidad (nadie entra en el autocar en todas esas paradas que hace el recorrido). El resultado: una gran ineficiencia energética, y una muy baja calidad del servicio de transporte (grandes tiempos de desplazamiento). Este es el contexto en el que el STI puede marcar unas grandes diferencias y propiciar una evolución en escalón.

En las figuras 124 a 126 mostramos los escenarios BAU y tecnología-E3.0 de consumo específico por vehículo, de factor de capacidad y de consumo específico por unidad de movilidad para los autocares.

Figura 124. Comparativa de los escenarios de consumo específico por vehículo de los autocares para los contextos BAU y tecnología-E3.0.

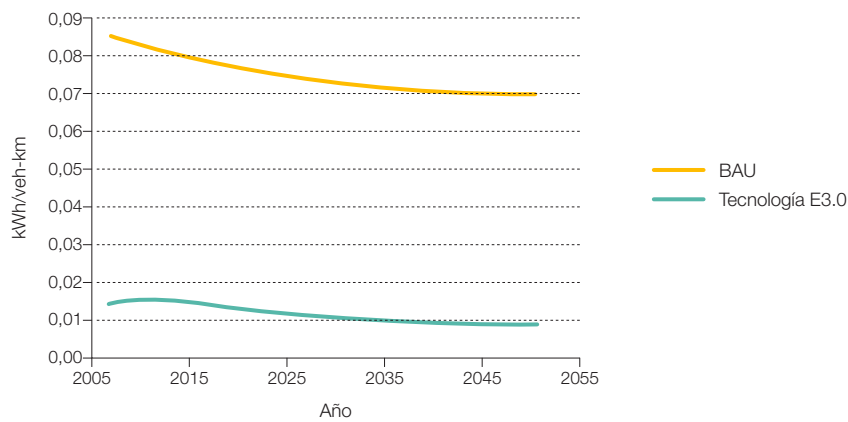


Figura 125. Comparativa de los escenarios de factor de capacidad de los autocares para los contextos BAU y E3.0.

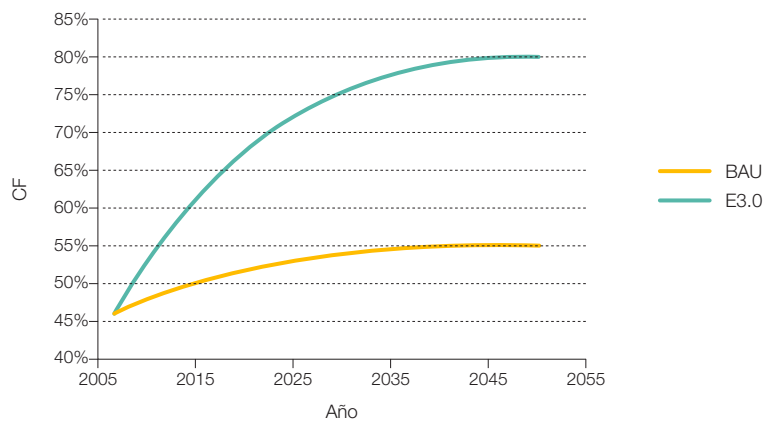
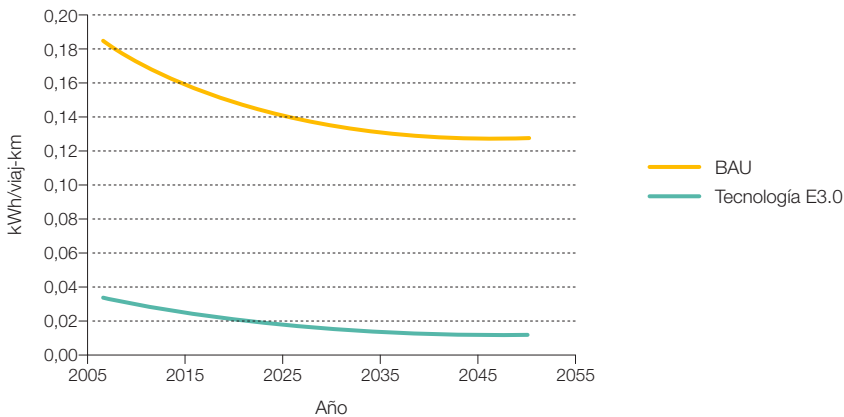


Figura 126. Comparativa de los escenarios de consumo específico por unidad de movilidad de los autocares para los contextos BAU y tecnología-E3.0.



3.6.3.4 Escenarios de transporte en autobús

Recogemos aquí los escenarios de autobús (transporte urbano de viajeros) en los contextos BAU y E3.0.

En el contexto BAU suponemos una hibridación creciente a partir del año 2014. La reducción del consumo de combustible alcanzable con la hibridación, consideramos que es menor en los autobuses que en los coches, pues actualmente ya están diseñados con más énfasis en la eficiencia.

En la tecnología E3.0 los autobuses son totalmente eléctricos³¹³, con consumos iniciales algo superiores que el autocar debido a las condiciones de conducción urbana³¹⁴, pero la reducción del consumo específico a lo largo del escenario es continua por no perseguir en estos vehículos un incremento en las prestaciones (innecesario en los ambientes urbanos).

Los CF en el contexto E3.0 son considerablemente superiores a los BAU, lo cual se

justifica por la existencia de un STI que involucra distintos tamaños de vehículo según la demanda de movilidad real.

El CF del contexto BAU lo suponemos menor en el autobús que en los autocares, por la mayor dificultad que habrá siempre de acoplar demanda con oferta, al emplear tamaños grandes estándar de autobús (sin STI).

Para el caso del autobús sí que hemos supuesto una gran hibridación del parque de vehículos en el contexto BAU, mientras que para los autocares no consideramos esta posibilidad en el desarrollo del escenario. Los motivos son los siguientes:

- Gran dinamismo de las empresas de transporte municipal, que en la actualidad ya están introduciendo muchas variantes encaminadas a sustituir el uso de los combustibles fósiles (biocombustibles, hidrógeno, GN, etc.)
- Requerimientos de reducción de la contaminación en ambientes urbanos, donde las

313 En este informe, dentro del concepto de autobús eléctrico incluimos tranvías, trolebuses y otros vehículos colectivos eléctricos de superficie (consumos) parecidos.

314 Bien es cierto que en los sistemas de tracción eléctrica la congestión del tráfico tiene un menor efecto sobre la eficiencia del vehículo que en los sistemas con MCI.

Figura 127. Autobús eléctrico. Modelo Astonbus e-city 10, de 38 asientos y 61 plazas, velocidad punta de 80 km/h, potencia nominal del motor de 80 kW, autonomía de 500 km con baterías de 230 kWh.



emisiones, más allá de su efecto global sobre el cambio climático, producen importantes impactos sobre la salud. La electrificación presenta la ventaja de eliminar totalmente la gran mayoría de estos impactos (contaminantes gaseosos, ruido), por lo que parece que tiene razones de peso para imponerse incluso en el contexto BAU.

- El modo de conducción urbano se presta mucho más a la hibridación.
- Históricamente ya existe tradición en el uso de la electricidad para cubrir el sector de la demanda de movilidad al que apunta el autobús.

Por otro lado, en la actualidad ya se encuentran ofertas comerciales de autobuses eléctricos (figura 127).

En la figura 128 mostramos el escenario asumido para la hibridación³¹⁵ del autobús en el contexto BAU.

Las figuras 129 a 131 recogen los escenarios de consumo energético total por unidad de

vehículo, factor de capacidad y consumo energético por unidad de movilidad, tanto para el contexto BAU como para la tecnología E3.0. Como podemos apreciar una vez más, el potencial de ahorro asociado a la tecnología E3.0 es muy elevado, tanto por la electrificación total de los vehículos como por el incremento en el CF con el que se utilizan los vehículos. Adicionalmente, la capacidad de acumulación eléctrica de las baterías de estos autobuses, junto al hecho de que el patrón de uso del parque de autobuses es muy predecible, y de que se encuentra explotado por grandes empresas que evitan la necesidad de que intervenga el agregador de la demanda, para facilitar la integración de la *Demand Side Management* (DSM) con el sistema eléctrico, proporciona grandes ventajas desde el punto de vista del funcionamiento de un sistema energético integrado.

315 Al igual que en el caso de los coches, la hibridación la definimos en función del combustible sustituido, por tanto, los porcentajes presentados son superiores a los que se obtienen haciendo el cociente de consumo eléctrico a consumo total (debido a la mayor eficiencia de la motorización eléctrica).

Figura 128. Escenarios de hibridación del autobús en contexto BAU. La hibridación se define basándose en combustible sustituido, y representa el valor promedio del parque de vehículos.

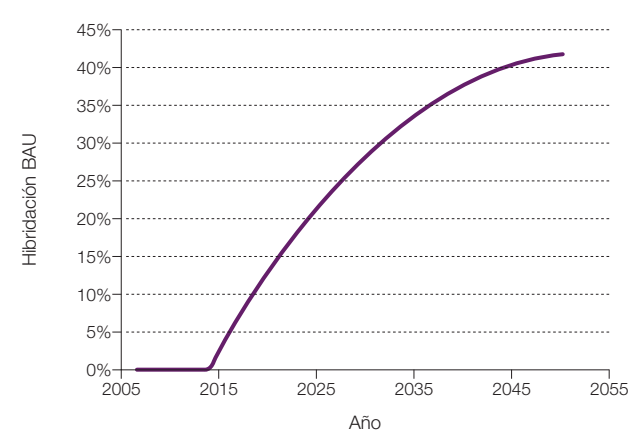


Figura 129. Escenarios de consumo total específico por vehículo del bus en los contextos BAU y tecnología-E3.0.

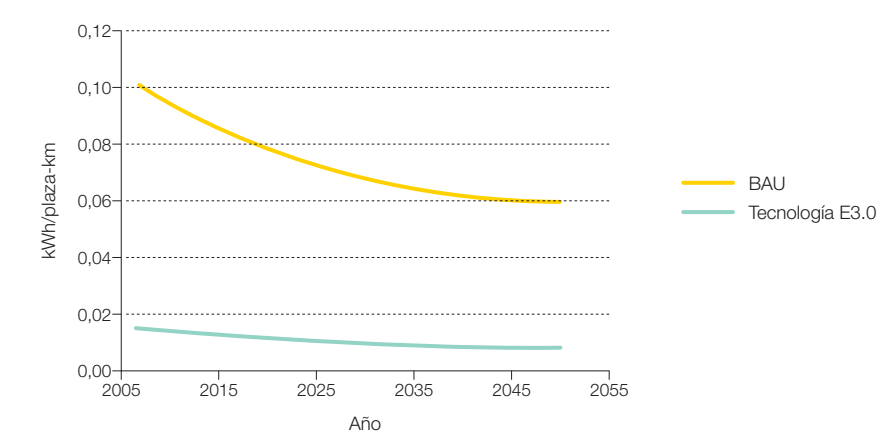


Figura 130. Escenarios de factor de capacidad del autobús en los contextos BAU y E3.0.

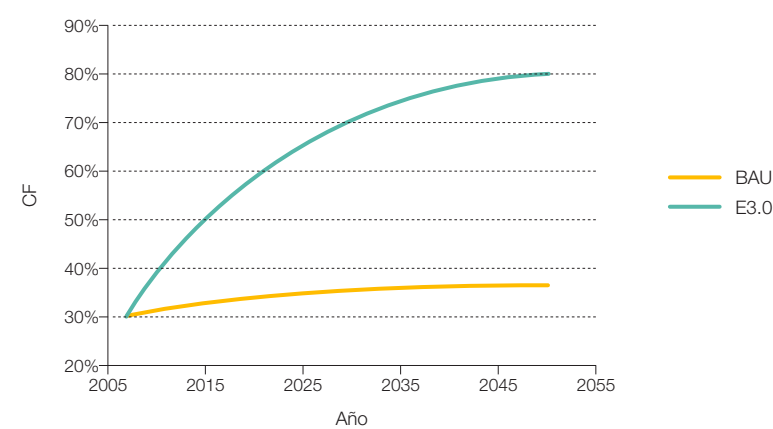
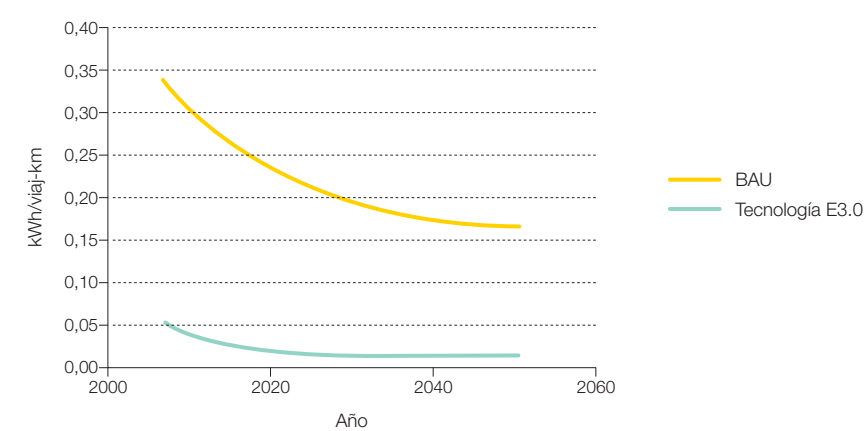


Figura 131. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para el autobús en los contextos BAU y tecnología-E3.0.



3.6.3.5 Escenarios de transporte de pasajeros en tren

En este punto recogemos los escenarios para transporte interurbano de viajeros por ferrocarril.

Para el caso del ferrocarril, por lo que se refiere a los consumos específicos por unidad de plaza, suponemos que los escenarios BAU y E3.0 no se diferencian en exceso: ambos acaban incorporando todo el potencial de frenado regenerativo, e implementando las mismas técnicas de conducción eficiente, reducción de peso, electrificación y mejoras técnicas.

Sin embargo, por lo que al CF se refiere, en el contexto E3.0 consideramos que es superior por la integración del tren en el STI, y por una mayor participación del tren de alta velocidad. En el contexto BAU hay una mayor participación de los trenes de pequeño recorrido y bajo CF, cuya demanda de movilidad, en el contexto E3.0 se cubre en buena medida con otro tipo de vehículos eléctricos con mayor CF.

Este modo de transporte es el que presenta un menor potencial de mejora, pues ya hace tiempo que se encuentra en la senda³¹⁶ de alcanzar todos los beneficios en eficiencia de la electrificación.

Otro aspecto interesante de apuntar es que los trenes, en el contexto de los escenarios aquí desarrollados, presentan consumos específicos ligeramente superiores a los de los coches y autocares eléctricos, aspecto que se ve más acentuado para los trenes de cercanías, que en condiciones BAU operan con menores CF, y además en condiciones BAU resultan considerablemente más inelásticos que estas otras opciones para cubrir una

buen parte de la demanda de movilidad. Sin embargo, en un contexto E3.0, el STI debe optimizar la infraestructura existente de medios de transporte eficientes, por lo que los otros vehículos eléctricos pasan a actuar como facilitadores de la optimización de la operación del tren, y acercan en origen y destino el tren (y particularmente el de cercanías) a la demanda de movilidad, lo cual conduce a un incremento del CF con que se opera el tren, y por tanto a una mejora de su eficiencia.

Por tanto, en un contexto E3.0 la percepción del papel que puede jugar el tren para reorientar el sector transporte hacia la sostenibilidad difiere sensiblemente de la percepción que tenemos en el contexto actual, o incluso en un escenario BAU. En efecto, con un STI y la electrificación de los otros modos de transporte, el tren pierde en gran medida su ventaja diferencial actual en términos de eficiencia, y se puede quedar con algunos de sus inconvenientes (rigidez para acoplarse a la estructura de la demanda de movilidad, dependencia de infraestructuras, gran peso, etc.). La labor del STI en el contexto E3.0 es, por tanto, la de optimizar e integrar la infraestructura existente de trenes dentro del sistema de transporte.

Por otro lado, existe otro motivo para que el tren tenga una participación importante en el contexto E3.0, debido a su capacidad de desplazar al avión en los desplazamientos de larga distancia. El tren de alta velocidad constituye la alternativa más eficiente a la movilidad aérea dentro del territorio nacional³¹⁷, y esta tendencia que ya estamos experimentando con la puesta en operación de las primeras líneas de trenes de alta velocidad, pasa a ser uno de los principales valores añadidos del tren en la cobertura de la demanda de movilidad en un contexto E3.0.

³¹⁶ Si bien todavía existe en España una parte muy grande de los trenes que funcionan con combustible diésel, en las condiciones del actual sistema eléctrico el consumo específico en términos de energía primaria es parecido en ambos casos, y la vía para la electrificación total es muy directa cuando aparezcan las señales de precio adecuadas (en la actualidad, muchos de los trenes diésel están circulando bajo catenaria).

³¹⁷ E incluso a los países vecinos.

Los consumos específicos planteados representan un promedio de los trenes de alta velocidad, largo recorrido y cercanías. Asimismo, estos son consumos de energía final en el tren, e incluyen tanto la electricidad como el gasóleo. La progresiva electrificación de los trenes, que actualmente funcionan con gasóleo, es una de las responsables de la reducción de consumo específico plantada en

los escenarios. La electrificación asumimos que es común a los contextos BAU y E3.0.

La figura 132 nos muestra el escenario de electrificación de los ferrocarriles en los escenarios BAU y E3.0³¹⁸. De acuerdo con esta creciente electrificación y a otras mejoras técnicas y de explotación, el escenario de consumo específico de los trenes por

Figura 132. Evolución de la fracción eléctrica de la energía consumida por los trenes: Contextos BAU & E3.0.

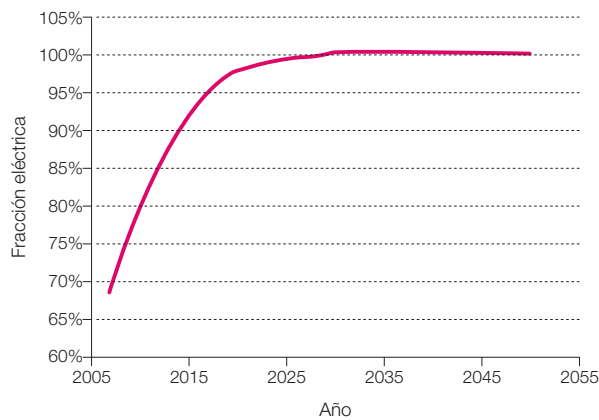
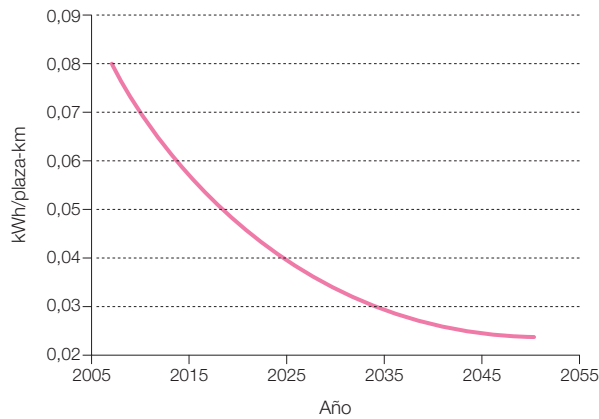


Figura 133. Consumo específico del tren por plaza disponible. Escenario común para los contextos BAU y E3.0.



318 Nótese que ya incorpora escenario de transición.

plaza es el que presentamos en la figura 133, también común³¹⁹ para los contextos BAU y E3.0. Por lo que respecta a los escenarios de evolución de los CF, en la figura 134 los encontramos recogidos. Como podemos observar es en este punto donde el contexto E3.0 se distancia del BAU, por lo que al ferrocarril se refiere. El hecho de estar integrado en un STI, y el mayor peso de los trenes de alta velocidad en el contexto E3.0

permiten progresar mucho más rápido en la mejora del CF.

Como consecuencia de todo esto, en la figura 135 encontramos los escenarios de evolución del consumo específico por unidad de movilidad. Como podemos ver, el contexto E3.0 nos proporciona una situación más favorable que el BAU, pero la diferencia es significativamente menor que para otros

Figura 134. Escenarios de factor de capacidad del tren para los contextos BAU y E3.0.

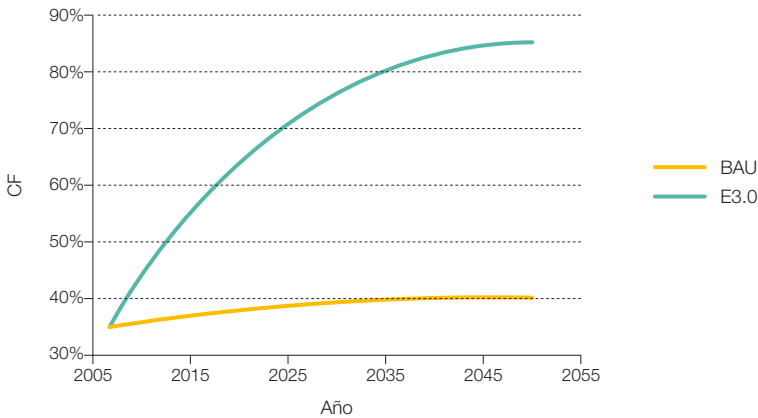
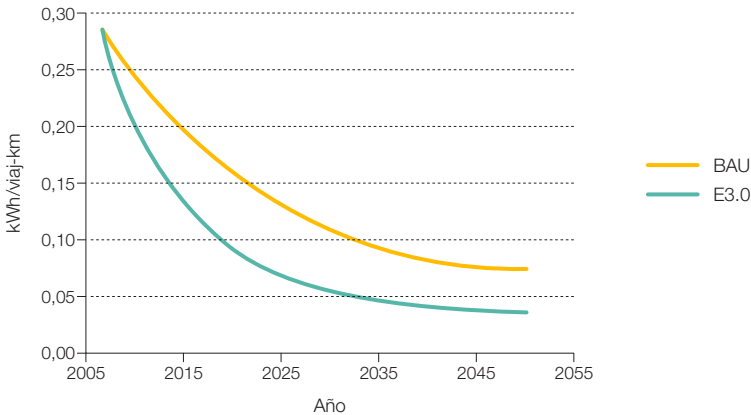
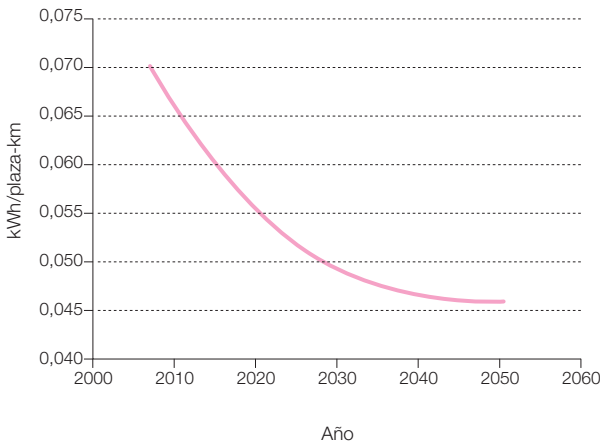


Figura 135. Escenarios de consumo específico del tren por unidad de movilidad para los contextos BAU y E3.0.



319 El hecho de que supongamos la misma evolución del consumo específico por plaza de los trenes en los contextos BAU y E3.0 puede parecer un tanto conservador. A priori cabría esperar que en el contexto E3.0 los trenes evolucionarán más rápidamente hacia la eficiencia, por ejemplo mediante una electrificación más acelerada de las líneas actualmente operadas con gasóleo. Sin embargo, por un lado consideramos que dada la madurez del sector ferrocarril por lo que respecta a la electrificación no cabe esperar ritmos de electrificación excesivamente distintos entre los contextos BAU y E3.0. Por otro lado, en el contexto E3.0 el peso de los trenes de alta velocidad es superior al que hay en el contexto BAU, por lo que los incrementos en eficiencia diferenciales que pudiera haber en el contexto E3.0 cabe esperar que en el promediado del parque de trenes se equilibren con las mayores velocidades de los trenes en el contexto E3.0, conduciendo a consumos específicos por unidad de plaza comparables. Donde sí que cabe esperar una mayor diferenciación entre los contextos BAU y E3.0 es en los escenarios de evolución de los CF promediados del parque de trenes, mucho más favorable para el contexto E3.0 apoyado por el STI y dominado por los desplazamientos de largo recorrido y elevada velocidad.

Figura 136. Evolución del consumo específico del metro para los contextos BAU y E3.0.



modos de transporte. Sin embargo, el elemento diferencial que sigue dando un protagonismo importante al tren en el escenario E3.0 es su capacidad de sustituir el modo aéreo, cuyos consumos específicos son muy superiores.

3.6.3.6 Escenarios de transporte en metro

La reducción potencial en el consumo del metro es inferior al del ferrocarril. Por un lado ya se encuentra totalmente electrificado, y si bien puede acceder a un mayor uso del frenado regenerativo, debido a que tiene trayectos mucho más cortos entre parada y parada que el tren, tiene menos potencial de mejora por conducción eficiente, y además, el efecto túnel empeora su aerodinámica respecto a la de un tren.

Por lo que respecta a la evolución de la tecnología, no cabe esperar tampoco grandes diferencias entre el contexto BAU y el E3.0, motivo por el que suponemos el mismo escenario para ambos, recogido en la figura 136.

La diferenciación entre el contexto E3.0 y el BAU se manifiesta en los factores de capacidad que consigue alcanzar el metro. Partiendo de los bajos factores de capacidad actuales, la mejora en el contexto BAU se ve limitada por la rigidez de este modo de transporte, mientras que en el contexto E3.0, el STI permite que el modo de carretera colectivo electrificado y los modos no motorizados actúen como una extensión del metro acercándolo en origen y destino a la demanda de movilidad, de tal forma que faciliten la mejora del aprovechamiento de esta infraestructura de transporte. La figura 137 recoge los escenarios de evolución del factor de capacidad, mientras que la figura 138 recoge los consumos por unidad de movilidad.

Figura 137. Evolución de los factores de capacidad del metro para los contextos BAU y E3.0.

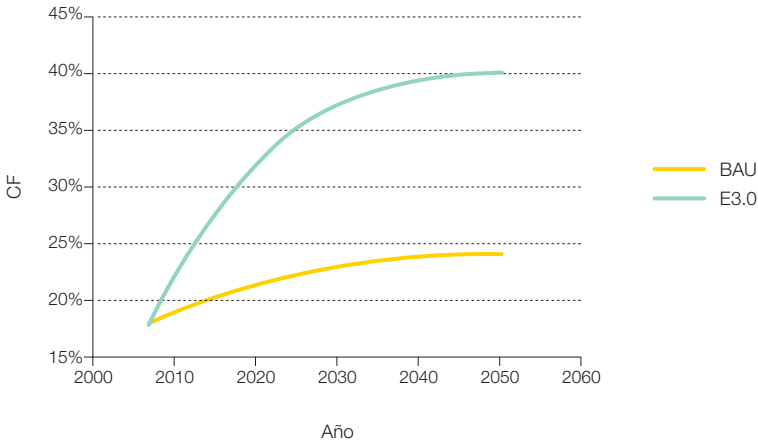
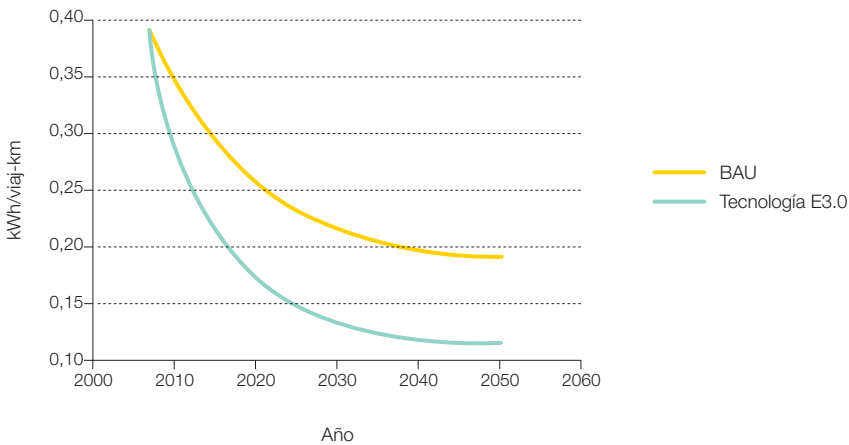


Figura 138. Consumo específico por unidad de movilidad para el metro en los contextos BAU y E3.0.



3.6.3.7 Escenarios de transporte de viajeros por avión

El avión es el modo de transporte más problemático a la hora de reconvertir el sistema de transporte hacia la sostenibilidad. En efecto, el consumo específico de este modo de transporte es el más elevado, pero al mismo tiempo satisface una demanda de movilidad para la cual hay pocas opciones de otros modos de menor consumo que la puedan cubrir. Por si esto fuera poco, tampoco tenemos alternativas al uso de combustible para operar los aviones, y además partimos de una situación en la que ya se encuentran altamente optimizados, y dejan poco margen de mejora en su eficiencia energética. En estas condiciones, tal como se apunta en (MacKay D.J.C., 2008) la única opción para que los aviones no consuman más energía es dejarlos en tierra.

Por lo que respecta al potencial de mejora de los vehículos y sus motorizaciones, los aviones son probablemente el modo de transporte en el que más se ha avanzado en lo que respecta a su eficiencia. Sigue habiendo algo de margen para la mejora en aerodinámica y motores, así como en operativas³²⁰, pero por este camino no cabe esperar avances espectaculares.

Por lo que respecta a la operación de los aviones, los modelos de negocio actuales de las compañías aéreas ya tienen las señales adecuadas para buscar optimizar su explotación. Los aviones comerciales ya vuelan a una velocidad del orden de la óptima desde el punto de vista del consumo energético, y los factores de capacidad que se alcanzan ya son de los más elevados que encontramos en los distintos modos de transporte.

Por otro lado, actualmente no se vislumbra ninguna opción de electrificación de este

modo de transporte aplicable a gran escala. En efecto, si bien ha habido alguna experiencia de vuelos de aviones eléctricos sus prestaciones eran muy inferiores a las de los aviones actuales, por lo que no podrían cubrir el nicho de mercado específico del transporte aéreo de viajeros. Asimismo, si bien existen otras opciones de transporte aéreo de menor consumo, como los dirigibles³²¹ y los ekranoplane³²², ninguna de ellas proporciona las prestaciones adecuadas para suplantar al transporte aéreo en su nicho de mercado más específico: transporte rápido a larga distancia.

Por otro lado, el nicho de mercado que ocupa actualmente el avión es difícil de sustituir por otros modos de transporte. Para los desplazamientos de menor distancia, como los nacionales en España, el tren es la opción más eficiente con capacidad de suplantar al avión. Este es un proceso que en nuestro país ya se ha iniciado con la puesta en marcha de las primeras líneas de tren de alta velocidad, siendo las propias fuerzas de mercado las que permiten implementar este cambio modal, pues el tren de alta velocidad proporciona el servicio de movilidad con unos tiempos totales comparables y con mayor comodidad. Por este motivo, en el contexto E3.0 intentamos estirar al máximo las opciones del tren de alta velocidad para sustituir a los aviones, abarcando los desplazamientos peninsulares e incluso accediendo a una porción de los desplazamientos a países cercanos. Una de las mayores diferencias entre el contexto E3.0 y la realidad actual del desarrollo del tren de alta velocidad es que en el contexto E3.0, éste no se usa como excusa para dismantelar el sistema ferroviario sino para reforzarlo con un crecimiento muy ambicioso del peso del ferrocarril en el transporte de viajeros y mercancías, y en sinergia con un sistema inteligente de transporte por carretera. Sin embargo, para los desplazamientos de mayor distancia,

³²⁰ Como el planeado en aterrizaje.

³²¹ Su consumo específico es como el de un tren, pero se desplaza a 80 km/h, por lo que no puede acceder al mercado de movilidad específico de los aviones.

³²² Avión que vuela pegado al mar (efecto suelo para sustentación), que le permite alcanzar un consumo del orden de la mitad del consumo de un avión por el aire. Las limitaciones de vehículo respecto al avión convencional es no poder operar por encima de tierra firme, y a menores velocidades.

el tren (ni que sea de alta velocidad) ya no puede competir con el avión, por lo que nos queda un sector de la demanda de movilidad para el que no disponemos de alternativas más eficientes. La única opción de eficiencia con este sector de la demanda de movilidad es reducirla lo más posible, y aquí, elementos como la desmaterialización de la economía

son prácticamente las únicas herramientas disponibles³²³. Por tanto, la parte de la demanda asociada al modo aéreo, en un escenario E3.0, tendrá que operar con biokeroseno o con hidrógeno, con las limitaciones e ineficiencias que esto supone para el sistema energético.

Figura 139. Evolución del factor de capacidad del transporte aéreo de viajeros en los contextos BAU y E3.0.

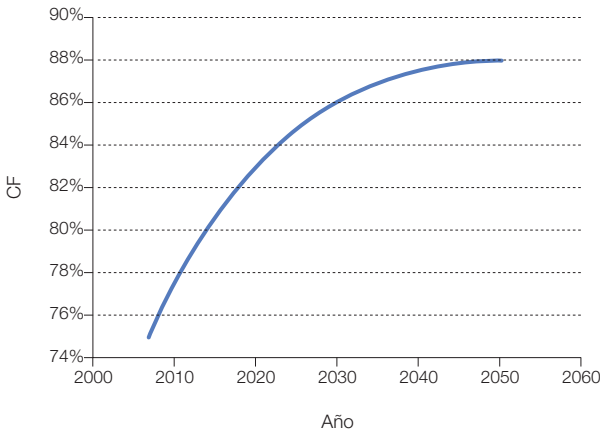
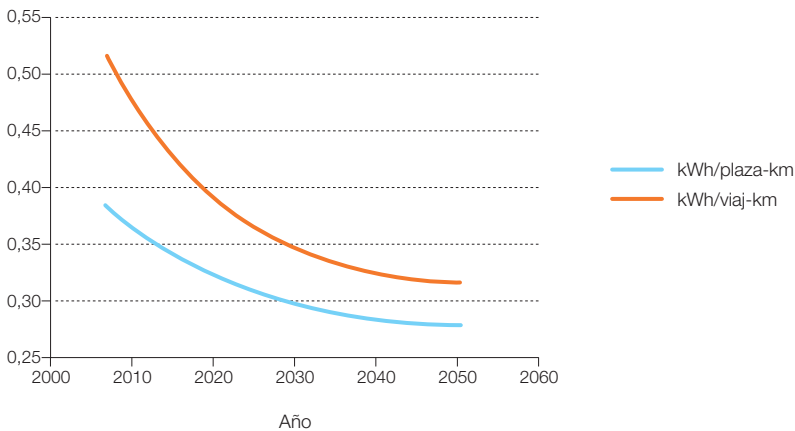


Figura 140. Escenarios de consumo específico y consumo por unidad de movilidad para el transporte aéreo de viajeros en los contextos BAU y E3.0.



323 También cabría la opción de plantear un cambio cultural para usar menos el avión, pero este es un mecanismo de respuesta muy lento como para contar con él en el contexto de urgencia actual, y no disponemos prácticamente de ningún medio de controlar o encauzar esta evolución más allá de emitir las señales de precio adecuadas. De hecho, en la actualidad la tendencia de la demanda ha evolucionado en dirección contraria, alimentada en parte por señales de precio erróneas. Pero más allá de corregir esta ineficiencia de mercado, pocos mecanismos más nos quedan para acotar la demanda de movilidad aérea sin proporcionar un cambio modal que cubra las expectativas de la demanda.

Por ahora tampoco cabe plantearse un enfoque no basado exclusivamente en la oferta para el transporte por aire. Por tanto, de acuerdo con todo lo anterior, planteamos para el modo aéreo el mismo escenario para los contextos BAU y E3.0. En las figuras 139 y 140 recogemos los escenarios de factor de capacidad, consumo específico por plaza y consumo específico por unidad de movilidad.

3.6.3.8 Escenarios de transporte de viajeros por barco

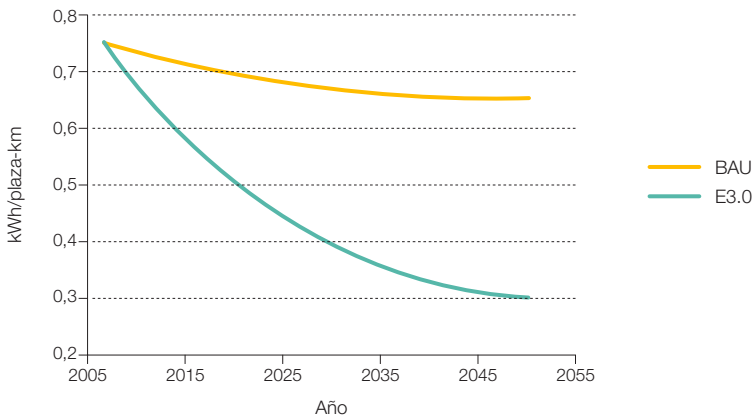
El modo marítimo para el transporte de viajeros es, en nuestro país, relativamente poco importante, y en los escenarios de demanda de movilidad que hemos elaborado, incluso en el contexto E3.0, sigue teniendo un peso relativamente pequeño.

Una visión más futurista de la que nosotros hemos planteado, podría pensar en un esquema de barcos eléctricos que recargan en electrolineras de centrales marinas de

generación con olas y eólicas, por lo que esta parte de la demanda podría llegar a electrificarse. El tema de llevar baterías pesadas³²⁴ a bordo, en el caso de los barcos, es mucho menos crítico que para los aviones. Sin embargo, no hemos localizado referencias de planteamientos parecidos a éste, probablemente por la estrecha relación que guardan con el despliegue de una infraestructura de electrolineras marinas asociadas a centrales de olas y eólicas autónomas. Por tanto, no planteamos la electrificación del modo marítimo en el contexto E3.0, lo cual implica que la parte de la demanda de movilidad que deba cubrirse por mar en el contexto E3.0, al igual que en el transporte aéreo, va a poder cubrirse tan solo con biocombustibles o hidrógeno, con las consiguientes restricciones asociadas a la limitación de recursos (biomasa) e ineficiencias en el sistema energético (hidrógeno).

Para el contexto BAU planteamos un escenario tendencial acorde con las tendencias históricas, con una ligera mejora en la eficiencia de los barcos y un factor de capacidad que tiende a estabilizarse hacia el final del escenario.

Figura 141. Escenarios de consumo específico por unidad de plaza para el transporte marítimo de viajeros en los contextos BAU y E3.0.



324 Por lo que respecta al aire comprimido, sus densidades de potencia son menores que en las baterías, y sus características de descarga menos apropiadas para las condiciones de operación de los barcos (largos tiempos de descarga a potencia constante), por lo que tampoco la hemos considerado.

Para el contexto E3.0 planteamos un escenario más ambicioso, que incluye aportes renovables locales como apoyo eólico, con velas de altura de guiado automático³²⁵, y uso de barcos de menor consumo apoyado por el STI.

En la figura 141 mostramos la evolución del consumo específico del parque de barcos por

unidad de plaza ofertada, en la figura 142 la evolución del factor de capacidad con el que se usan los barcos, y en la figura 143 los correspondientes escenarios de consumo específico por unidad de movilidad, todo ello para los contextos BAU y E3.0³²⁶.

Figura 142. Escenarios de factor de capacidad para el transporte marítimo de viajeros en los contextos BAU y E3.0.

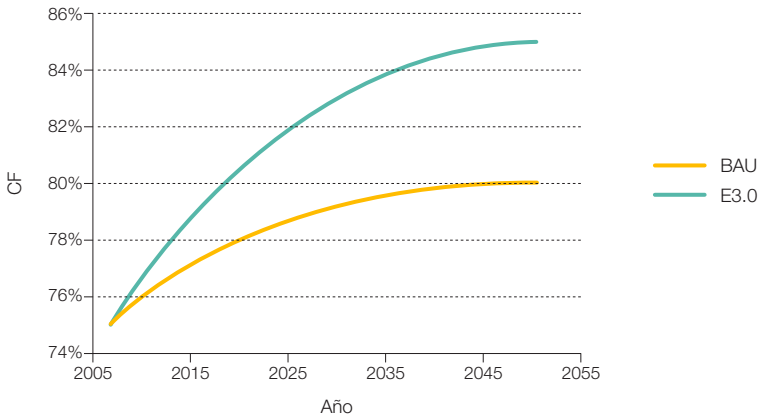
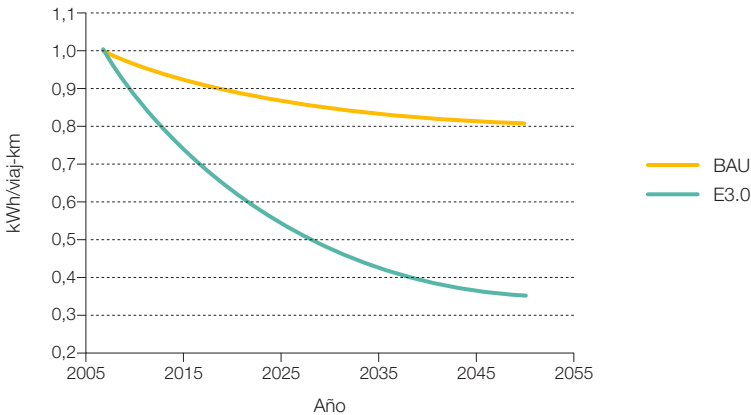


Figura 143. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para el transporte marítimo de viajeros en los contextos BAU y E3.0.



325 Tecnología que ya se ha empezado a implementar, y que si bien funciona solo como apoyo a la tracción principal por motorización de combustible, también permite alcanzar ahorros importantes en consumo de combustible.

326 En el caso del contexto E3.0, para este modo de transporte en que no prevemos la posibilidad de implementar saltos en escalón, ya incluimos en los escenarios un único escenario de transición.

3.6.3.9 Escenarios de transporte de mercancías por carretera urbana

Para el caso del transporte urbano de mercancías el único modo es por carretera.

En el contexto BAU tomamos un valor medio de consumos específicos entre los correspondientes a las furgonetas y los camiones ligeros.

En este contexto consideramos que todos los vehículos operan con combustible, es decir, no consideramos la hibridación³²⁷.

Por lo que respecta al CF, en el contexto BAU planteamos un ligero incremento hasta acercarse al 40% (del orden de lo que encontramos en otros países). No resulta fácil alcanzar valores superiores del CF en el contexto de

Figura 144. Escenarios de consumo específico por capacidad de carga para el transporte urbano por carretera de mercancías, en los contextos BAU y tecnología-E3.0.

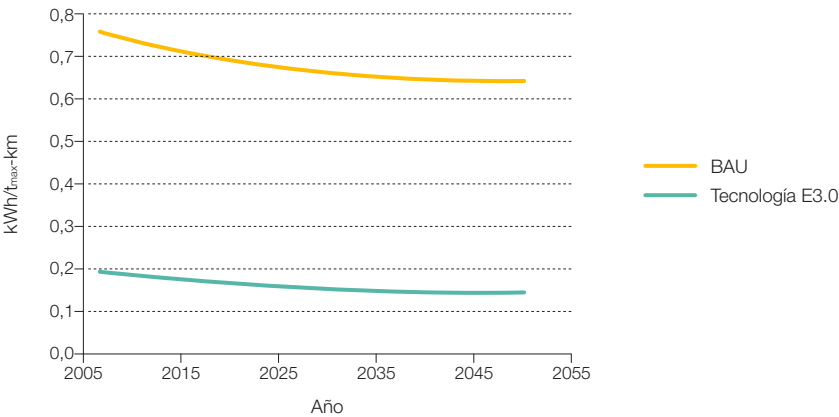
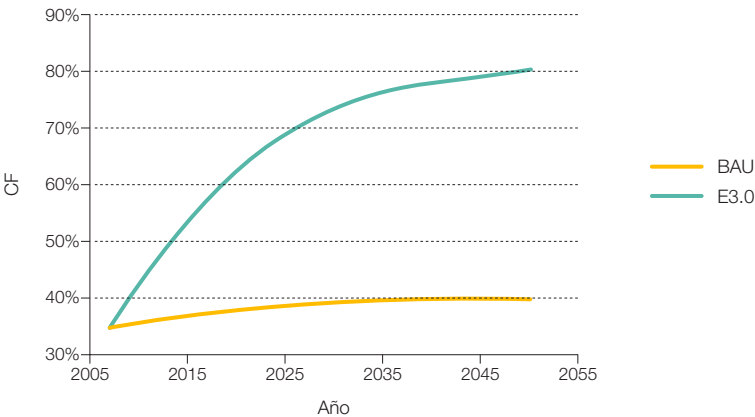
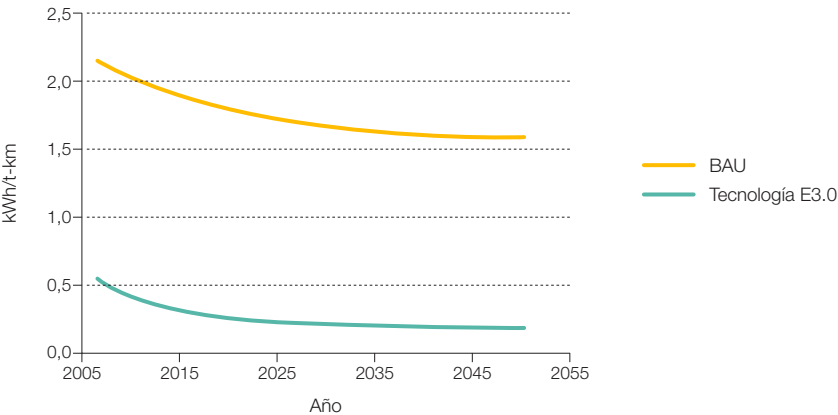


Figura 145. Escenarios de factor de capacidad para el transporte urbano por carretera de mercancías, en los contextos BAU y E3.0.



327 Consideramos que para el caso del transporte urbano de mercancías, bajo un enfoque BAU de elevada atomización de las empresas de transporte de mercancías, y con los modelos de negocio actualmente implementados, resulta difícil de justificar el sobrecoste de un vehículo con doble motorización en términos de rentabilidad de negocio. En el caso de los autobuses, sí que consideramos una hibridación en el contexto BAU, pero este hecho diferencial es coherente con la evolución actual de los autobuses urbanos (buscando soluciones de baja contaminación), en relación con el reparto de mercancías (insensibles a la problemática por no estar gestionados por la empresa pública y operar con modelos de negocio que no dan cabida a estas medidas de eficiencia). Sin embargo, la aparición de una regulación específica orientada a este tipo de vehículos, o un gran incremento en el precio de los combustibles fósiles, podrían abrir la puerta a la entrada de la hibridación en este segmento de movilidad para el contexto BAU.

Figura 146. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para el transporte urbano por carretera de mercancías, en los contextos BAU y tecnología-E3.0.



atomización empresarial y sin la implementación de inteligencia (smart logistics).

En el contexto E3.0, en el marco del STI tenemos vehículos eléctricos con elevado CF, por lo que tampoco diferenciamos tipologías de vehículos, dado que sus consumos específicos son del mismo orden.

En las figuras 144 a 146 encontramos los escenarios BAU y tecnología-E3.0 para el consumo específico por capacidad de carga, el factor de capacidad³²⁸ y el correspondiente consumo específico por unidad de movilidad.

3.6.3.10 Escenarios de transporte de mercancías por avión

Para el transporte aéreo de mercancías nos encontramos en la misma situación anteriormente expuesta para el transporte aéreo de viajeros: es el modo de mayor consumo específico, se encuentra ya altamente optimizado, y en su nicho de demanda de movilidad no existen opciones para introducir un cambio modal por no proporcionar los otros modos

las características de movilidad que proporciona el transporte aéreo. Por tanto se trata de un modo problemático.

Afortunadamente, la demanda de movilidad de mercancías por avión es mucho más limitada que la de viajeros, por lo que su peso sobre el consumo energético total, y por tanto su impacto sobre los recursos de biomasa e ineficiencias asociadas a la generación de hidrógeno serán menores. Adicionalmente, esta pequeña demanda de movilidad aérea de mercancías también hace pensar que corresponde a un nicho de demanda difícil de cubrir con otras opciones de movilidad.

Si observamos la estructura actual de consumos específicos de este modo de transporte de mercancías, podemos ver que, con diferencia, la mayor ineficiencia está asociada al transporte a corta distancia, que es precisamente el que es susceptible de ser sustituido por otros modos de transporte (figura 147). En esta figura también podemos apreciar los elevados consumos asociados a este modo de transporte de mercancías en relación a otros modos.

³²⁸ Para el caso del factor de capacidad, como en los otros modos de transporte, incorporamos ya el escenario de transición.

Según estos argumentos, y dada la limitada participación de este modo tanto en el contexto BAU como en el E3.0, planteamos un escenario común para ambos contextos, en los que se consigue una reducción del consumo específico tanto por mejoras técnicas, como

por mejoras de tráfico aéreo, y por limitar el uso de este modo para los desplazamiento de mayor distancia, y se implementan medidas para incrementar el factor de capacidad. En las figuras 148 y 149 presentamos los correspondientes escenarios.

Figura 147. Valor actual del consumo específico por unidad de movilidad para el transporte de mercancías por avión, según (DEFRA, 2009).

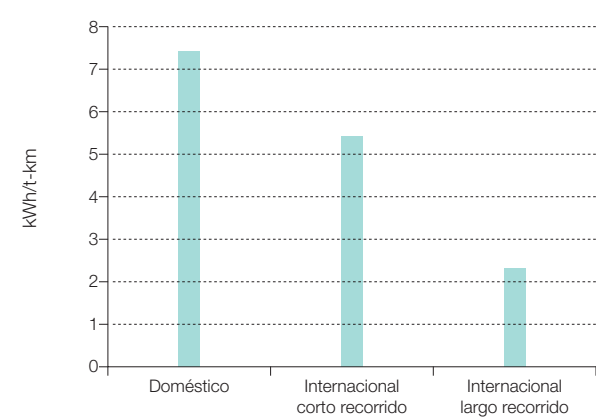


Figura 148. Escenario de evolución del factor de capacidad del transporte aéreo de mercancías por avión para los contextos BAU y E3.0.

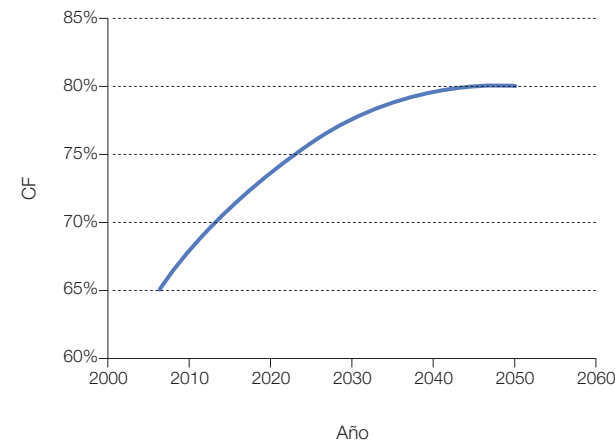
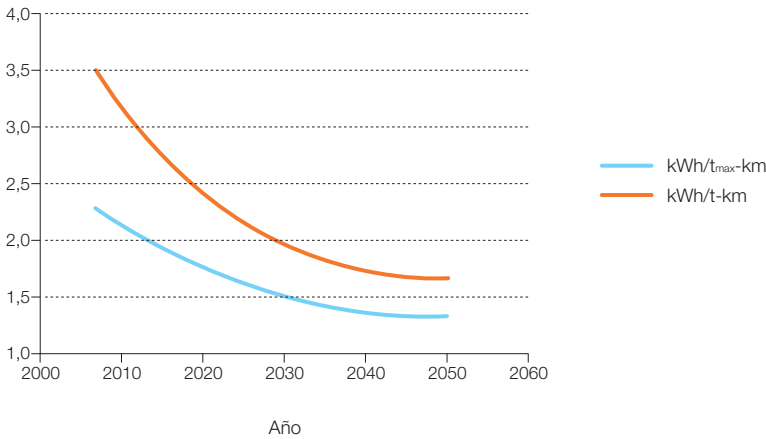


Figura 149. Escenarios de consumo específico por capacidad de carga y por unidad de movilidad para el transporte de mercancías por avión, en los contextos BAU y E3.0.



3.6.3.11 Escenarios de transporte de mercancías por carretera interurbana

El transporte de mercancías por carretera es el modo dominante tanto en el contexto BAU como en el E3.0. Los valores del consumo específico por unidad de movilidad dependen mucho del tamaño del camión empleado (figura 150). Por estos motivos, vamos a elaborar este escenario de forma disgregada para camiones de tamaño medio (MC) y de tamaño grande (GC), para posteriormente pasar a agruparlos en un valor ponderado que represente correctamente este modo de movilidad de mercancías.

Para el contexto BAU consideramos que los camiones funcionan exclusivamente con MCI (no electrificación), y proyectamos escenarios de incremento de eficiencia de los camiones medianos y grandes a lo largo del periodo considerado. Una característica del sector transporte por carretera en el contexto BAU, es la gran atomización del sector y la ausencia de introducción de cantidades de inteligencia significativas en el mismo, lo cual limita

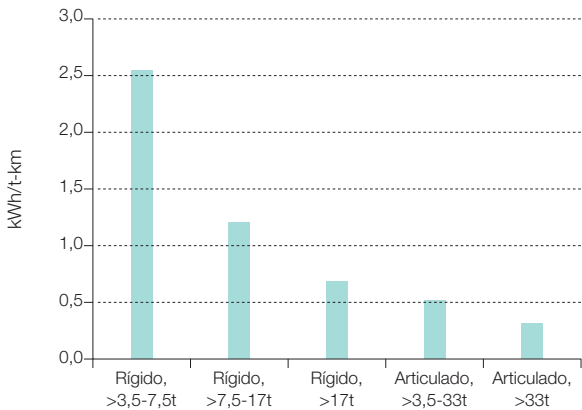
mucho la evolución de los factores de capacidad medios con los que se usa la flota de camiones. Planteamos, por tanto, para el CF unos escenarios con un ligero crecimiento a lo largo del periodo considerado, tanto para los grandes camiones como para los medianos. Por lo que respecta a la fracción de camiones medianos sobre el total de camiones de la flota planteamos un escenario en el que evoluciona de forma decreciente a lo largo del periodo considerado desde valores superiores³²⁹ a la media de OCDE Europa, hacia valores del orden pero ligeramente superiores a los existentes en OCDE Europa. En conjunto, las mejoras proyectadas en el contexto BAU para el consumo específico por unidad de carga y el factor capacidad, así como el reparto entre camiones medianos y grandes, conducen a un consumo total por unidad de movilidad ligeramente inferior al proyectado por la AIE en el WEO 2007.

Para el contexto E3.0 planteamos una hibridación creciente³³⁰ del parque de camiones, con ritmos superiores de electrificación para los camiones medianos que para los grandes.

329 El hecho de considerar en el BAU una mayor fracción de camiones más pequeños que los valores promedio en OCDE Europa está asociado a la mayor atomización del sector transporte por carretera en España.

330 La electrificación de los camiones para el transporte interurbano de mercancías requerirá del desarrollo de una infraestructura de recarga y sustitución de baterías, que especialmente para los grandes camiones llevará un tiempo para su desarrollo. De ahí que en el contexto E3.0 se planteen escenarios con hibridación creciente partiendo desde valores muy bajos. Es importante resaltar que, el desarrollo de esta red de electrolineras para los grandes camiones en el contexto de un STI, presenta importantes sinergias con el desarrollo de la red de electrolineras para el transporte de viajeros.

Figura 150. Valores actuales del consumo específico por unidad de movilidad de los camiones en UK según su tamaño (DEFRA, 2009).



Para el caso del transporte de mercancías dentro del contexto E3.0 sí que nos parece justificado el planteamiento de la hibridación de la flota de camiones. Por un lado, esta electrificación viene impulsada por la necesidad de reservar los biocombustibles, o el uso del hidrógeno, para aquellas aplicaciones que no tengan otra opción viable por la escasez de biomasa por un lado, y las ineficiencias del vector hidrógeno por otro. Por otro lado, dentro del contexto de un STI con un sistema logístico inteligente, la flota de camiones se usa con un CF considerablemente elevado, por lo que resultan viables mayores inversiones en los camiones, máxime cuando este cambio de motorización permite obtener ingresos adicionales por participación en el mercado eléctrico ofreciendo servicios complementarios³³¹. La infraestructura de intercambio modal del STI permite también ubicar con mayor facilidad las electrolineras y puntos de recarga de las baterías de estos camiones eléctricos.

Para el contexto E3.0 la hibridación³³² planteada en estos escenarios debe entenderse a nivel de flota, donde coexisten vehículos con

MCI, híbridos, y totalmente eléctricos para aquellos trayectos que lo soporten³³³.

Por lo que se refiere al reparto entre camiones medianos y grandes, en el contexto E3.0 planteamos un porcentaje creciente de vehículos medianos a lo largo del escenario, justificado por la optimización de recursos a la que conduce el STI, de tal forma que los desplazamientos de camiones grandes se limitan a las situaciones en que pueden realizarse con CF elevado. En este contexto, los camiones medianos a menudo hacen solo parte de los trayectos hasta llegar a los centros modales donde se cambia a camiones grandes o al tren. Por otro lado, la diferencia de consumos entre camiones medianos y grandes, gracias a la mayor electrificación de los camiones medianos que los grandes, en el contexto E3.0 no es tan grande.

En las figuras 151 a 154 presentamos los escenarios de consumo específico a carga máxima, hibridación en el contexto E3.0, factor de capacidad y consumo específico por unidad de movilidad, tanto para los camiones medianos como para los grandes, y para

331 Sin embargo, el abanico y extensión de servicios complementarios al sistema eléctrico, desde los centros de recarga de las baterías de los camiones, puede ser más limitado que el asociado a los vehículos particulares dado el elevado factor de utilización de los equipos.

332 Nótese que, a pesar de la gran hibridación planteada (90% en camiones medianos y 70% en los grandes para 2050 en términos de movilidad), el 57,8% del consumo en 2050 sigue siendo combustible (debido a la mayor eficiencia de la tracción eléctrica).

333 Los cuales se irán incrementando a medida que se evolucione por el periodo de tiempo considerado en estos escenarios.

ambos contextos BAU y tecnología-E3.0. La figura 155 muestra los escenarios de participación de los camiones medianos en la flota total de camiones en términos de movilidad

cubierta, y finalmente, la figura 156 recoge los consumos específicos por unidad de movilidad del conjunto de las flotas de camiones en los contextos BAU y tecnología-E3.0.

Figura 151. Escenarios de consumo específico por capacidad de carga para el transporte de mercancías por carretera, en los contextos BAU y E3.0, y para los camiones medianos (MC) y grandes (GC).

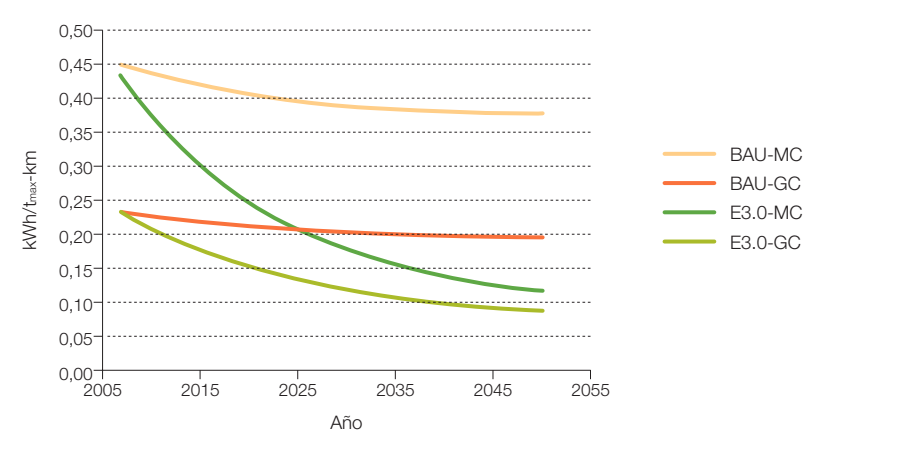


Figura 152. Escenarios de hibridación (en términos de cobertura de la demanda de movilidad) de los camiones medianos (MC) y grandes (GC) en el contexto E3.0.

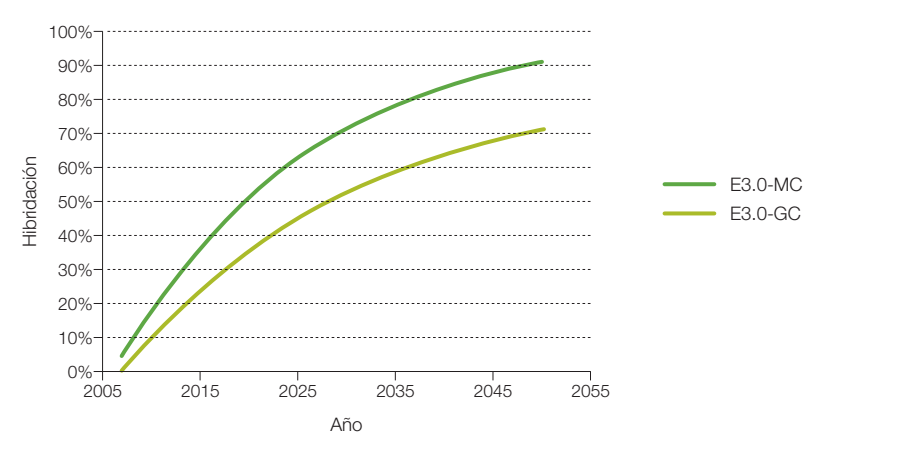


Figura 153. Escenarios de factor de capacidad para el transporte de mercancías por carretera, en los contextos BAU y E3.0, y para los camiones medianos (MC) y grandes (GC).

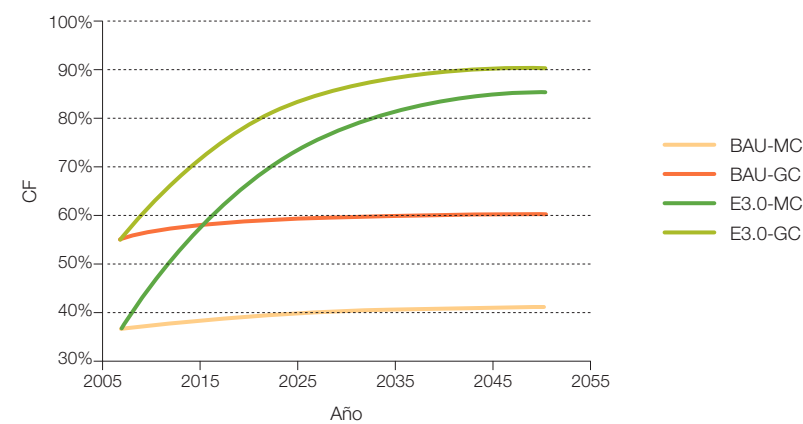


Figura 154. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para el transporte de mercancías por carretera, en los contextos BAU y E3.0, y para los camiones medianos (MC) y grandes (GC).

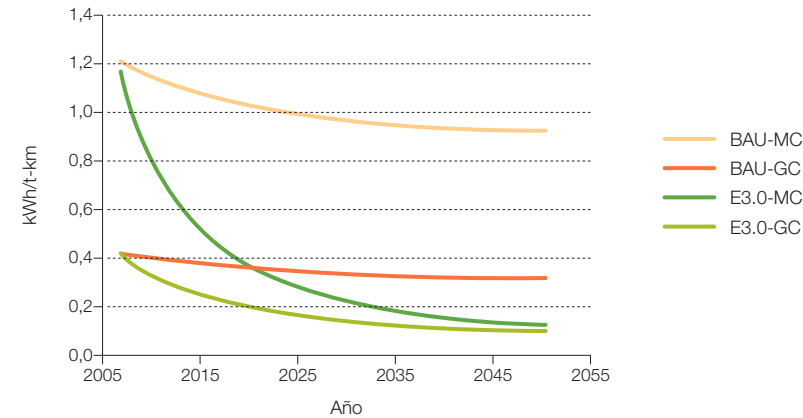


Figura 155. Escenarios de fracción de camiones medianos (en términos de movilidad) en los contextos BAU y E3.0.

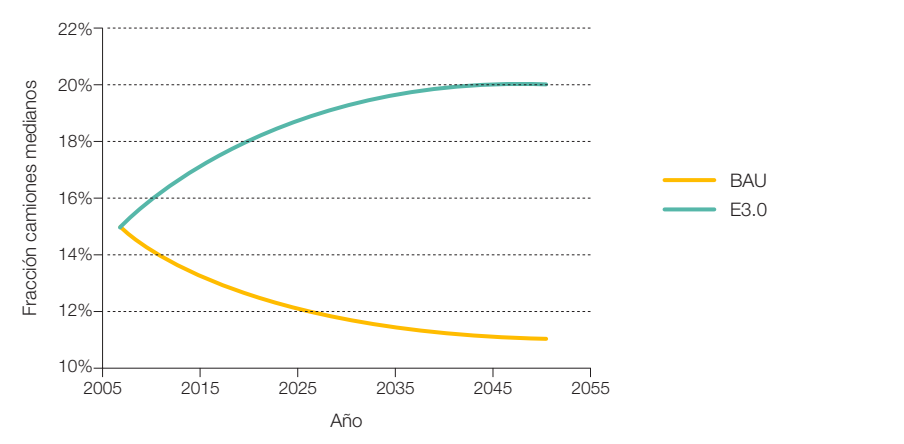
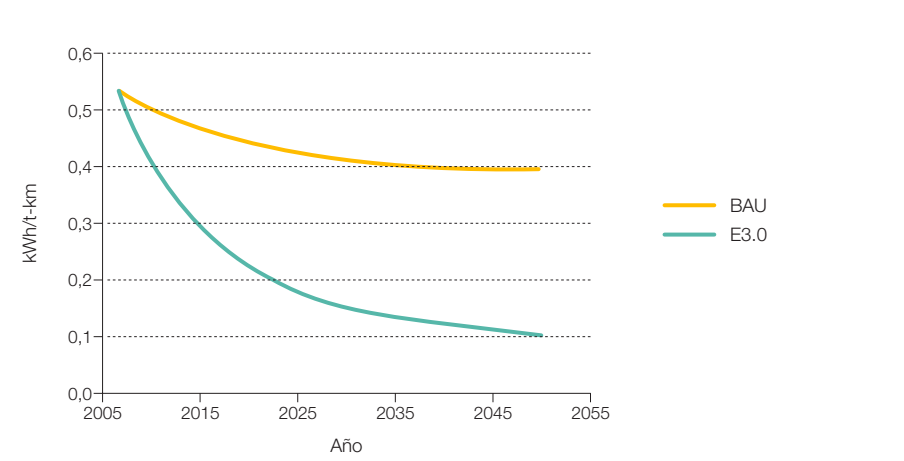


Figura 156. Escenarios de consumo específico ponderado por unidad de movilidad para el transporte de mercancías por carretera en los contextos BAU y E3.0.



3.6.3.12 Escenarios de transporte de mercancías en ferrocarril

Para los escenarios relativos al transporte de mercancías por ferrocarril establecemos una aproximación parecida a la del ferrocarril para viajeros. Por un lado, suponemos un escenario de electrificación de los ferrocarriles

común a los contextos BAU y E3.0, así como un escenario de mejora de la eficiencia³³⁴ de los trenes también común a ambos contextos. La diferenciación entre los contextos BAU y E3.0 proviene de las mayores tasas de mejora del factor de capacidad para el contexto E3.0, gracias a la integración del ferrocarril en un STI.

Figura 157. Escenario de evolución de la electrificación de los ferrocarriles, en contexto BAU y E3.0.

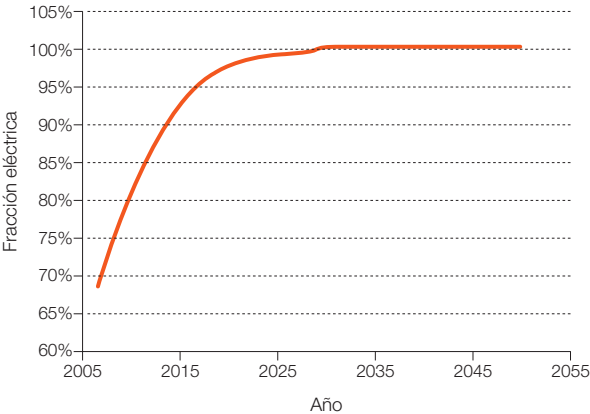
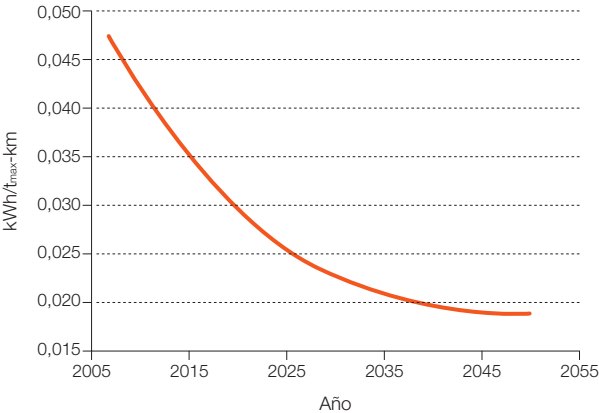


Figura 158. Escenario de evolución del consumo específico a plena carga para el transporte de mercancías por ferrocarril en los contextos BAU y E3.0.



334 La electrificación tiene un papel importante en esta mejora. Otros componentes son la mejora del aprovechamiento del frenado regenerativo, reducción del peso y otras mejoras técnicas en los ferrocarriles.

Resulta interesante resaltar que para el transporte de mercancías el ferrocarril sí que resulta más eficiente que la carretera, incluso bajo en contexto E3.0, en contra de lo que sucedía para el transporte de viajeros. La causa de esta diferencia es la menor electrificación que hemos asumido para el transporte de mercancías por carretera respecto a la que

asumimos para el transporte de pasajeros por carretera. En las figuras 157 y 158- mostramos los escenarios de electrificación y de consumo específico a plena carga. La figura 159 nos presenta los escenarios de evolución de los CF, y la figura 160 recoge los escenarios resultantes de consumo específico por unidad de movilidad.

Figura 159. Escenarios de evolución del factor de capacidad para el transporte de mercancías por ferrocarril en los contextos BAU y E3.0.

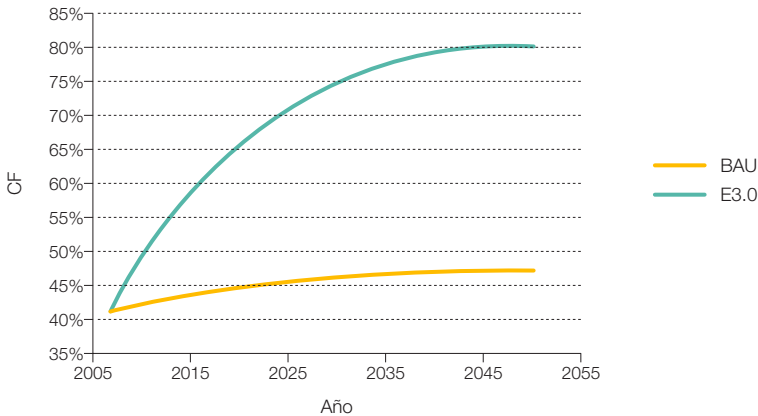
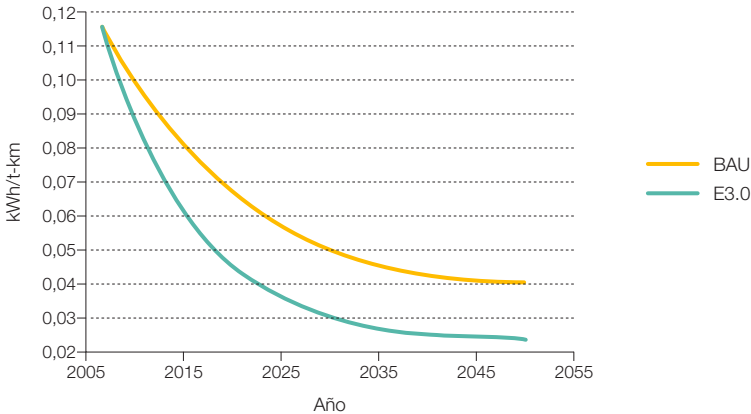


Figura 160. Escenarios de evolución del consumo específico por unidad de movilidad para el transporte de mercancías por ferrocarril en los contextos BAU y E3.0.



3.6.3.13 Escenarios de transporte
marítimo de mercancías

El consumo específico del transporte de mercancías por mar depende mucho del tipo de barco empleado, y puede oscilar entre 1.376 kWh/t-km para un Ferry hasta 0,014 kWh/t-km para un gran petrolero, pasando por 0,054 kWh/t-km para un barco mediano con contenedores. El transporte marítimo de cabotaje emplea barcos relativamente pequeños y tiene consumos específicos relativamente elevados, que no representan mejoras significativas respecto al tren. Además, el barco es menos susceptible de electrificación que el tren y en nuestro país no puede acceder a los emplazamientos interiores. Por tanto, no hay motivos para plantear un cambio modal del tren hacia el transporte marítimo. Sin embargo, por lo que respecta al transporte internacional de mercancías, el peso del transporte marítimo en nuestro país es importante.

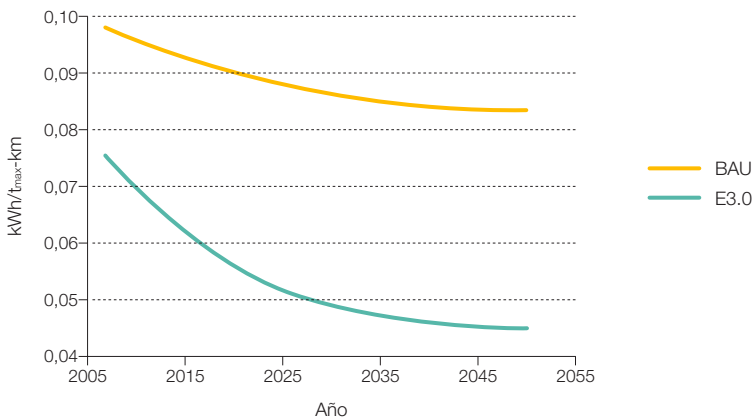
Planteamos un escenario BAU con una mejora gradual del consumo específico a plena carga, asociado tanto a mejoras técnicas de

los barcos y sus motorizaciones, como a un cierto desplazamiento hacia barcos de mayor tamaño. El CF en el contexto BAU también experimenta una ligera mejora a lo largo del escenario, y tiende a estabilizarse en los máximos valores que cabe esperar sin la entrada en escena de un STI.

Para el contexto E3.0, suponemos mayores tasas de eficiencia energética, con escalones respecto al BAU asociados a la introducción de la tracción eólica automatizada con velas de altura, y por acceder a barcos de mayor tamaño³³⁵ gracias al STI. El CF también alcanza valores considerablemente superiores en el contexto E3.0 gracias a la integración en el STI.

Es de resaltar que para el transporte marítimo no hemos planteado electrificación alguna, por lo que pasa a ser otro modo de transporte para el cual la biomasa y/o el hidrógeno son las únicas alternativas. Sin embargo, no parece tan descabellado en el marco de un STI el planteamiento de considerar una red de electrolineras y puntos de recarga marítimos, alimentados con energías renovables locales

Figura 161. Escenarios de evolución del consumo específico a máxima carga para el transporte de mercancías por barco en los contextos BAU y tecnología-E3.0.



335 Dado el pequeño alcance de este desplazamiento hacia mayores tamaños, así como a las reducciones de demanda de movilidad en el contexto E3.0, no cabe esperar que se requiera una modificación de la infraestructura portuaria.

(olas y eólica), que permitieran electrificar el transporte marítimo internacional, aligerando por tanto los requerimientos de un recurso escaso como es la biomasa, o de las ineficiencias de la introducción del hidrógeno como vector energético.

En las figuras 161 a 163 mostramos los escenarios BAU y E3.0 de consumo específico a máxima carga, factor de capacidad y consumo específico por unidad de movilidad para el transporte marítimo de mercancías.

Figura 162. Escenarios de evolución del factor de capacidad para el transporte de mercancías por barco en los contextos BAU y E3.0.

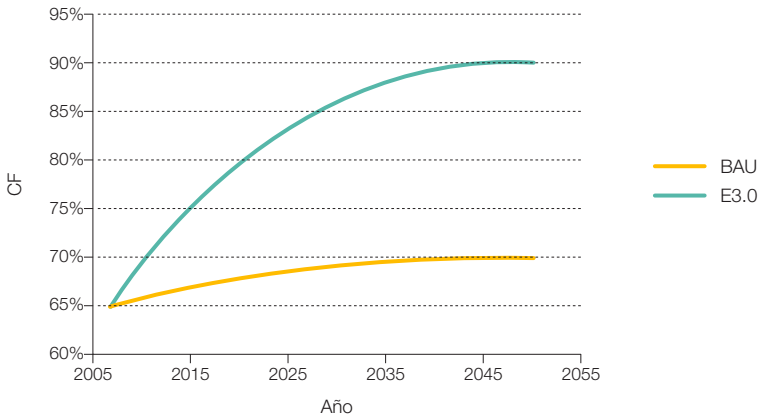
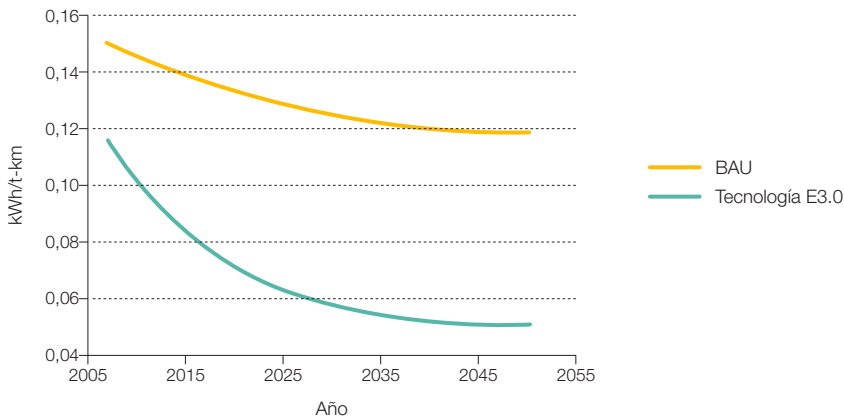


Figura 163. Escenarios de evolución del consumo específico por unidad de movilidad para el transporte de mercancías por barco en los contextos BAU y tecnología E3.0.



3.6.3.14 Escenarios de transporte de mercancías por tubería

En la actualidad, el transporte de mercancías por tubería se ve limitado a los productos petrolíferos y al gas natural. Si bien en un principio sería posible plantear el transporte de otro tipo de mercancías (sólidas) por tubería, un repaso a los consumos específicos alcanzables por este modo de transporte no parece recomendar la impulsión de este cambio modal.

La figura 164 nos muestra la dependencia del consumo específico por unidad de movilidad con el diámetro de las conducciones para los casos de los productos petrolíferos y el gas natural, a velocidades típicas de transporte de líquidos por tuberías. Esta figura nos muestra cómo al emplear diámetros suficientemente grandes, podemos acceder a valores bajos del consumo específico mediante este modo de transporte. Sin embargo, es preciso fijarse

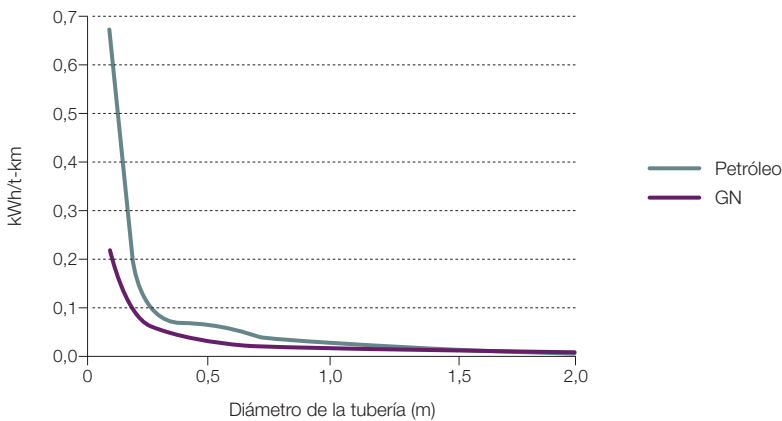
en el valor de la velocidad a la que se está transportando la mercancía en este caso, 5,4 km/h, un valor muy bajo respecto a lo que pueden ofrecer otros modos de transporte con consumos específicos comparables.

De hecho, si observamos la figura 165 en la que se evalúa el consumo específico del transporte por tubería de productos petrolíferos en función de la velocidad, vemos cómo para valores de la velocidad comparables a la de otros modos de transporte (60 km/h), el consumo específico por unidad de movilidad del modo tubería es mucho más elevado que el que proporcionan otras alternativas.

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta que para el caso de transportar productos sólidos la eficiencia del modo tubería sería incluso inferior, parece que no tiene interés alguno explorar las posibilidades de extender la aplicación del transporte por tubería a otros tipos de mercancías para que se

Figura 164. Dependencia del consumo específico por unidad de movilidad con el diámetro de la tubería para los productos petrolíferos (líquidos) y el gas natural. La velocidad del fluido en las tuberías es de 5,4 km/h, y el rendimiento total del bombeo del 50%.

$v = 1,5 \text{ m/s} = 5,4 \text{ km/h}$; $\eta_{\text{tot}} = 0,5$



hiciera cargo de una mayor fracción de la demanda de movilidad de mercancías.

De hecho, en el contexto actual en el cual los combustibles fósiles (petróleo y gas natural) se están agotando y las exigencias de compatibilidad con nuestro sistema climático nos requieren dejar de usar estos recursos de forma inminente, incluso antes de que se agoten, cabría preguntarse qué papel puede esperarse que desempeñe el transporte por tubería.

Por un lado, las infraestructuras para transportar estos productos ya están construidas (oleoductos y gaseoductos), y por otro lado, para los productos líquidos y gaseosos que llenen completamente las tuberías, y que, por tanto, su disponibilidad en punto de consumo sea inmediata al abrir la válvula de descarga, las bajas velocidades de transporte que permiten acceder a bajos consumos específicos por unidad de movilidad, resultan admisibles.

En este sentido, tanto en el contexto BAU (aunque más adelante en el tiempo), como en el contexto E3.0 parece que estas infraestructuras de transporte serían adecuadas para transportar combustibles derivados de la biomasa (biocombustibles, biogás, gas de gasógeno, etc.), desempeñando un papel parecido al que hacen en la actualidad.

En estas condiciones, establecemos un único escenario del transporte por tubería para los contextos BAU y E3.0.

El escenario elegido plantea una progresiva reducción del consumo específico por unidad de movilidad. Los orígenes de esta mejora en eficacia son los siguientes:

- Reducción de la rugosidad en las tuberías (materiales).
- Aumento del diámetro de las tuberías.
- Mejora en el rendimiento del bombeo.
- Reducción de la velocidad de circulación.
- Reparto del líquido y el gas.

Figura 165. Dependencia del consumo específico por unidad de movilidad con la velocidad del fluido para los productos petrolíferos (líquidos). El diámetro de la tubería es de 1 m, y el rendimiento total del bombeo del 50%.

$D = 1 \text{ m}$; $\eta_{\text{tot}} = 50\%$; combustible líquido

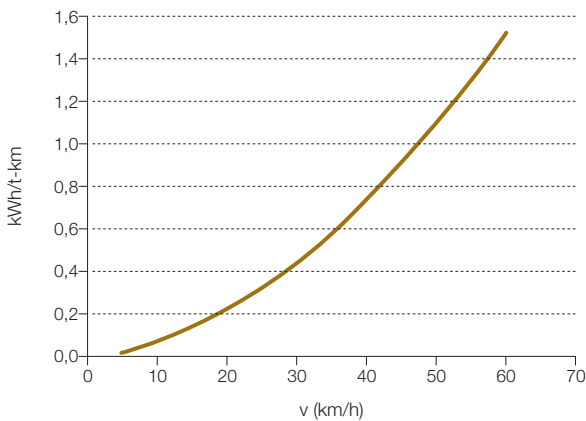
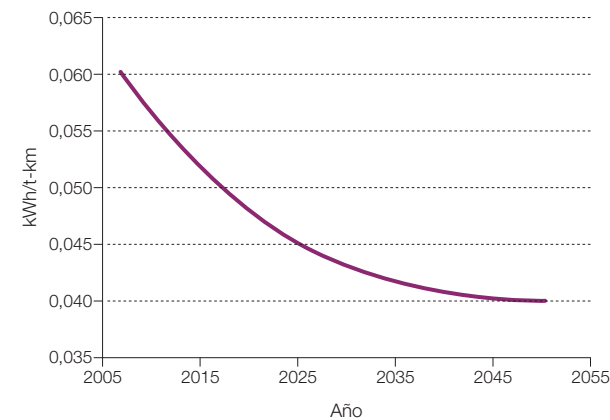


Figura 166. Escenario de evolución del consumo específico por unidad de movilidad para el transporte de mercancías por tubería en los contextos BAU y E3.0.



Este es un modo de transporte en el que los elementos STI no tienen potencial mejora (CF no interviene por encontrarse las tuberías permanentemente llenas del producto a transportar). En la figura 166 presentamos el escenario asumido para la evolución del consumo específico por unidad de movilidad.

3.6.3.15 Comparativa de los consumos específicos de los distintos modos viajeros

En este punto presentamos agrupados los escenarios BAU y tecnología E3.0 de consumo específico por unidad de movilidad, para el transporte de viajeros con el fin de obtener una visión de conjunto.

La figura 167 nos muestra la evolución del consumo específico por unidad de movilidad para el contexto BAU, en la que se ha considerado una tendencia decreciente para todos los modos. Dejando de lado el modo marítimo, que afortunadamente tiene un bajo peso en el reparto modal, observamos cómo los modos más dominantes (carretera y avión)

son también los de mayor consumo específico. En este contexto, en el que el potencial de mejora de estos modos dominantes es muy limitado, las opciones para intentar reducir el impacto energético del sector transporte pasan exclusivamente por buscar un cambio modal a los modos de menor consumo energético (los denominados transporte público en contexto BAU), pero en el contexto BAU el potencial de este cambio modal es muy limitado (y con tiempo de respuesta muy lento).

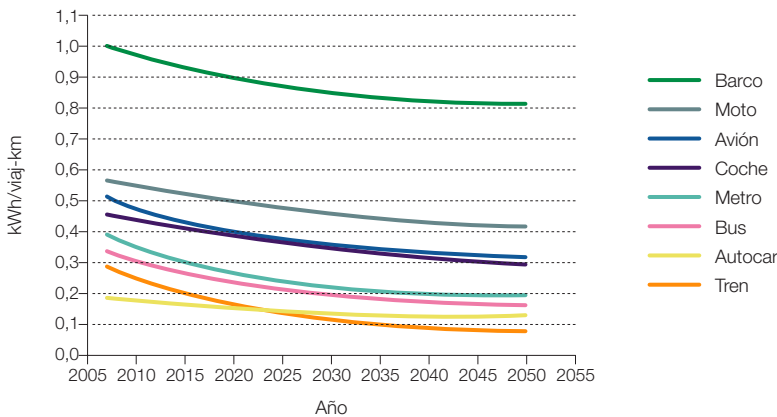
La figura 168 nos muestra el panorama de evolución de los consumos específicos de la tecnología-E3.0. Además de unas mayores tasas de reducción del consumo específico al avanzar a lo largo del escenario, podemos observar otro importante cambio cualitativo: el consumo específico de lo que en el contexto BAU denominábamos transporte por carretera particular (coches y motos), y que en el contexto E3.0 constituye uno de los componentes principales del transporte por carretera colectivo en el marco del STI, que ha reducido su consumo específico a valores del orden de los modos de transporte más eficientes (gracias a la electrificación y al incremento en el

CF que permite el STI). Dado que el peso específico de este modo de transporte es el dominante también en el contexto E3.0, esta reducción de consumo específico podría introducir una evolución en escalón del sector transporte, si los escenarios de transición tienen una tasa de cambio suficientemente elevada en la primera parte del periodo de tiempo considerado.

Por tanto, podemos concluir que una de las importantes estrategias del contexto E3.0 para poder facilitar la rápida evolución del sistema de transporte hacia una condición más sostenible, es un cambio de enfoque respecto a esos modos de movilidad que son dominantes y poco eficientes en la actualidad, pasando del enfoque convencional de pretender potenciar un cambio modal hacia otros modos más eficientes³³⁶, a reconvertir esos modos hacia la eficiencia (mecanismo de respuesta mucho más rápida y con un potencial muy superior de producir un cambio de gran magnitud).

En el contexto E3.0 el modo de transporte más problemático que permanece es el aéreo. Como vemos, por un lado es, después del modo marítimo, el modo de mayor consumo específico, pero además no permite su electrificación, por lo que sus únicas vías para operar con energías renovables son la biomasa (recurso limitado) y el hidrógeno (grandes reducciones de rendimiento). Y la reducción de demanda de movilidad por este modo mediante el traspaso a otra forma de transporte, también se encuentra limitada dadas las características diferenciales de este modo, en lo que respecta a tiempos de desplazamiento en trayectos largos. En estas condiciones, uno de los objetivos fundamentales del contexto E3.0 es limitar al mínimo los requerimientos de cobertura de movilidad por este modo, sustituyendo el avión hacia el ferrocarril en los desplazamientos interurbanos nacionales, en los que el ferrocarril puede ofrecer un servicio comparable e incluso mejor³³⁷ que el modo aéreo.

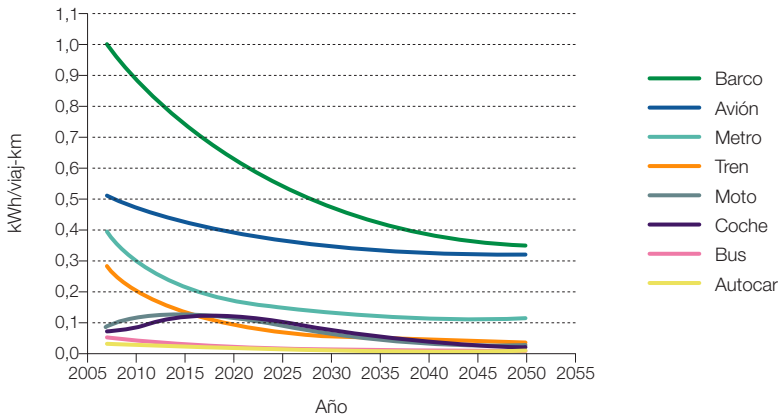
Figura 167. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para los distintos modos de transporte de viajeros en el contexto BAU.



336 Lo cual constituye un mecanismo de respuesta muy lenta, e incluso de dudosa viabilidad para potenciar un cambio significativo. En el contexto E3.0, esos modos minoritarios y eficientes en el contexto BAU, se potencian más allá de sus capacidades BAU mediante la interacción sinérgica con el modo dominante en el contexto E3.0, para optimizar el aprovechamiento de las infraestructuras existentes.

337 Dados los elevados retrasos asociados al trasvase de viajeros en los aeropuertos, y la problemática creciente asociada a la seguridad, para los desplazamientos nacionales el tren de alta velocidad ofrece actualmente un servicio de mayor calidad que el avión.

Figura 168. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para los distintos modos de transporte de viajeros en la tecnología E3.0.



3.6.3.16 Comparativa de los consumos específicos de los distintos modos mercancías

En este punto recopilamos los escenarios de consumo específico por unidad de movilidad de los distintos modos para el transporte de mercancías, para los contextos BAU y E3.0, con el fin de adquirir una perspectiva de conjunto.

Las figuras 169 y 170- nos muestran los escenarios correspondientes al contexto BAU para el transporte de mercancías. El primer punto que observamos es que los modos avión y carretera-urbano presentan un consumo específico tan elevado respecto a los otros, que se requiere una ampliación de la escala del gráfico para distinguir los otros modos. El modo carretera es el de mayor consumo comparado con el resto (por detrás del avión y del carretera-urbano). El modo aéreo tiene un bajo peso modal en el contexto BAU, pero el modo carretera es con diferencia el dominante, por lo que este elevado consumo específico, y el hecho de

que se deba cubrir con combustibles, representan una auténtica lacra para el modo transporte en el contexto BAU. El modo ferrocarril es en el contexto BAU el de mayor eficiencia, pero a falta de introducción de inteligencia, su participación modal se ve limitada a valores muy bajos.

Respecto a la tecnología E3.0, las figuras 171 y 172 nos muestran los escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para los distintos modos. Ahora, el único modo responsable de que tengamos que ampliar la escala es el aéreo. En efecto, el principal cambio en la tecnología E3.0 es que el consumo específico de los modos de transporte por carretera, se consiguen acotar de forma significativa, acercándolos a valores del orden de los de los modos más eficientes hacia el final del escenario. Sin embargo, el ferrocarril sigue presentando para el caso de las mercancías una eficiencia significativamente superior, motivo por el cual en el contexto E3.0 se busca favorecer un importante cambio modal hacia este modo (apoyado por el STI).

Figura 169. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para los distintos modos de transporte de mercancías en el contexto BAU.

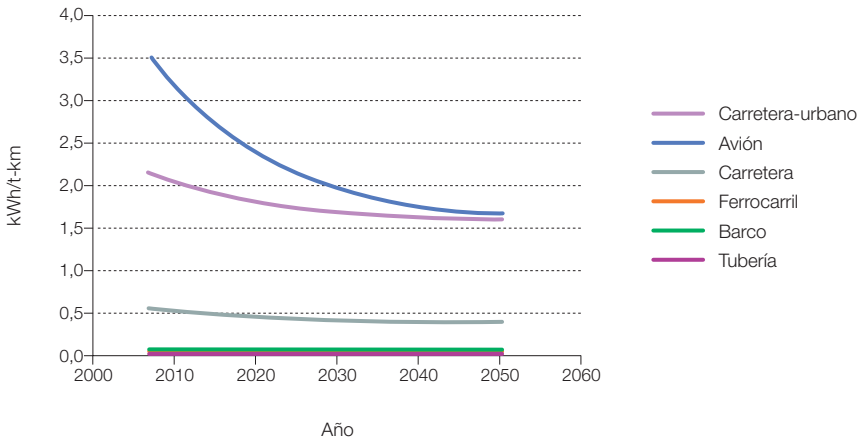


Figura 170. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para los modos de transporte de mercancías en el contexto BAU, excluyendo los modos dominantes de carretera y avión.

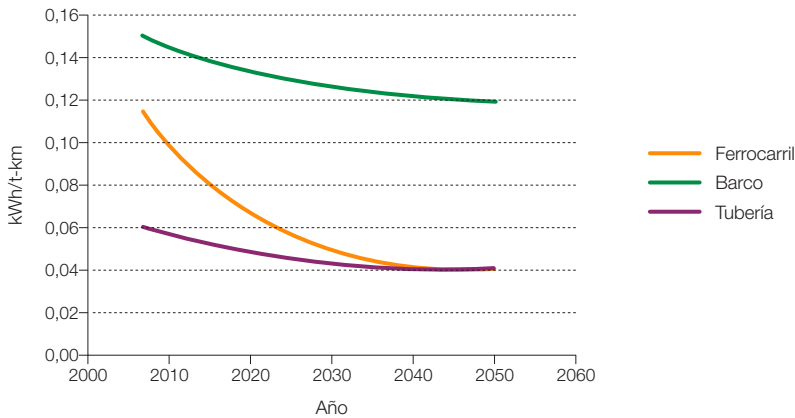


Figura 171. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para los distintos modos de transporte de mercancías de la tecnología E3.0.

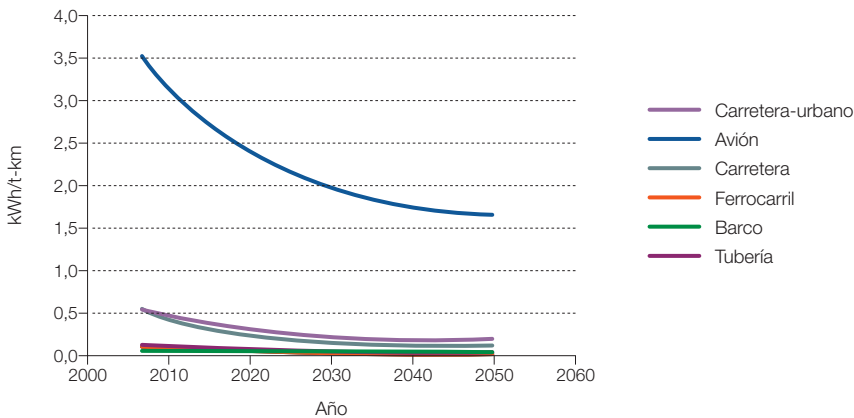
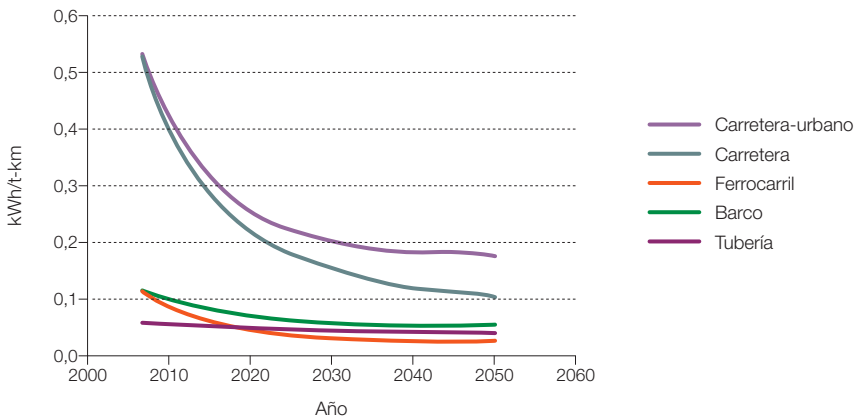


Figura 172. Escenarios de consumo específico por unidad de movilidad para los modos de transporte de mercancías de la tecnología-E3.0 excluyendo el modo dominante (avión).



3.6.4 Escenarios de demanda total en el sector transporte

En este punto juntamos los escenarios de demanda de movilidad, reparto modal y consumo específico modal, para configurar los escenarios de demanda energética del sector transporte. Presentamos, en primer

lugar, los resultados desagregados por movilidad de pasajeros y mercancías, para posteriormente analizar los valores totales, bajo los contextos BAU y tecnología E3.0.

Hay dos puntos que es preciso tener presente al analizar estos resultados, y cuyas implicaciones serán tratadas en apartados posteriores:

- La demanda energética aquí presentada procede de un análisis de abajo arriba, que parte de la estimación de la demanda de servicios (movilidad), y de la estimación de las prestaciones de las distintas tecnologías de transporte. La ventaja de este planteamiento es que permite establecer un modelo que relaciona de forma directa y causal la demanda del servicio y sus implicaciones energéticas, y proporciona información detallada sobre la estructura de la demanda energética, además de otorgar las herramientas para establecer una proyección de esta demanda en base, tanto a la evolución de la demanda de servicios, como la de las tecnologías empleadas para cubrirlas. Sin embargo, dada la falta de precisión y consistencia de las evaluaciones históricas de demanda de movilidad, y de consumos específicos de las tecnologías empleadas para cubrirla, que se han empleado para elaborar los escenarios, el resultado de este análisis no reproduce adecuadamente el consumo energético del sector edificación en el inicio del escenario, y requiere, por tanto, un calibrado inicial que se abordará en un apartado posterior. Sin embargo, a medida que avanza el periodo del escenario considerado, la incertidumbre del inicio del escenario que requirió ese calibrado inicial se va diluyendo, y queda la capacidad del modelo elaborado para establecer una relación causal directa, entre la demanda del servicio de movilidad y sus implicaciones energéticas para las tecnologías empleadas en la cobertura de la demanda de movilidad.

- Los escenarios recogidos en este punto corresponden a las trayectorias BAU y de tecnología E3.0. La transición desde la trayectoria BAU a la que nos ofrece la tecnología E3.0 puede seguir distintos caminos, y depende fundamentalmente de la velocidad a la que consigamos activar el proceso de

cambio a los inicios del periodo de tiempo considerado. En un apartado posterior analizaremos distintos escenarios de transición con sus implicaciones asociadas.

Recogemos, por tanto, a continuación la estructura de los escenarios de demanda energética tanto en contexto BAU como para la tecnología E3.0 que se desprenden del modelo elaborado, sin correcciones por calibrado inicial y sin introducción de escenarios de transición.

3.6.4.1 Movilidad de pasajeros

En la figura 173 presentamos los escenarios resultantes de demanda de energía para cubrir la demanda total de movilidad de viajeros en los contextos BAU y tecnología E3.0 según los inputs de demanda de movilidad y consumos específicos en el modelo del sector transporte. Como podemos ver, al final del escenario la demanda de energía de la tecnología E3.0 es del orden de un tercio de la BAU. En el caso del contexto BAU, la demanda de energía resulta aproximadamente constante³³⁸ a lo largo del periodo considerado, y contrasta el incremento de demanda de movilidad con la creciente eficiencia planteada³³⁹ para los distintos modos de transporte. En las figuras 174 y 175 mostramos estos escenarios desagregados en sus componentes urbana e interurbana.

³³⁸ Como veremos más adelante.

³³⁹ Como ya comentamos anteriormente, se trata de escenarios BAU bastante más progresistas que los habitualmente planteados, que si bien no llegan a evolucionar hacia la contracción, por lo menos sí hacia la contención de la demanda.

Figura 173. Escenarios de demanda total de energía final para cubrir las demandas de movilidad total de viajeros en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

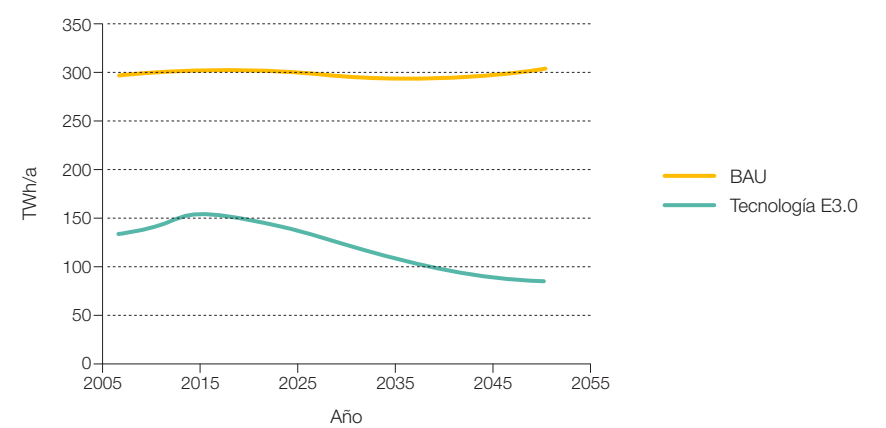


Figura 174. Escenarios de demanda total de energía final para cubrir las demandas de movilidad interurbana de viajeros en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

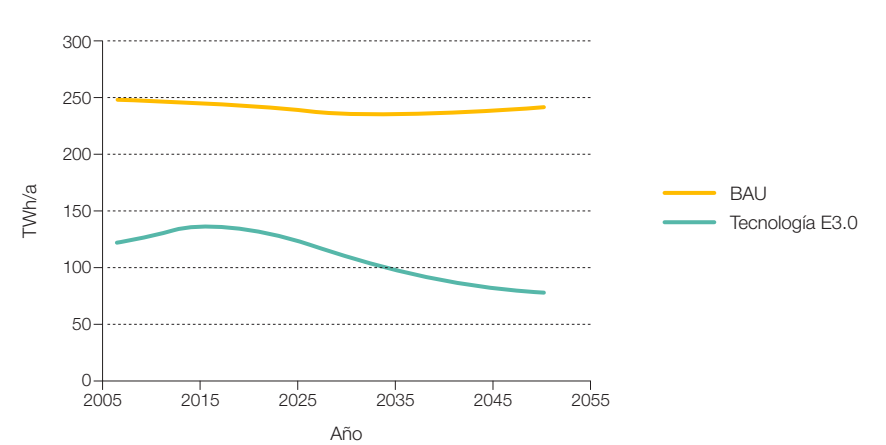
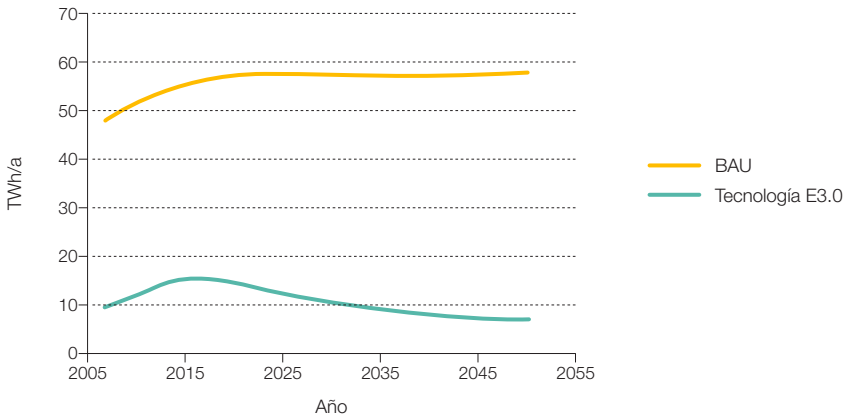


Figura 175. Escenarios de demanda total de energía final para cubrir las demandas de movilidad urbana de viajeros en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.



Otro análisis relevante es la desagregación de la demanda de energía entre aquella que se demanda en forma de electricidad y la que es en forma de un combustible. Esta diferenciación es relevante por diversos motivos:

- La demanda eléctrica, si se da por sentado que el sistema eléctrico evolucionará hacia niveles crecientes de participación de las energías renovables tanto en el contexto BAU como en el E3.0 (aunque a distintas velocidades), va a poder acceder al grueso de recursos renovables en nuestro país.
- La demanda de combustible, en el contexto BAU, va estar en las primeras décadas del escenario asociada al consumo de combustibles fósiles, y por tanto, directamente relacionada con las emisiones de GEI, con la dependencia energética, y con el galopante coste energético. Una vez que los costes de los combustibles fósiles se hagan prohibitivos con motivo de la gran demanda a nivel mundial y la limitación de recursos, esta demanda tendrá que abastecerse en

el contexto BAU con el uso de la biomasa, y dada la limitación de recursos en nuestro país, nos conducirá a la necesidad de importar este recurso (es decir, una vez más a la dependencia energética).

- Incluso en el contexto E3.0, la demanda de combustible habrá que compararla con el recurso disponible de biomasa, y analizar la necesidad de recurrir al vector hidrógeno con la consiguiente penalización en la eficiencia del sistema energético.

La figura 176 nos muestra la demanda de electricidad para cubrir la demanda de movilidad de viajeros. Como vemos, la tecnología E3.0, con su decidido impulso a la electrificación del transporte, demanda más electricidad, especialmente al inicio del escenario, con un pico entrono al año 2018 debido al incremento de demanda de prestaciones de los vehículos eléctricos al principio de su introducción. Este pico de demanda eléctrica puede ser relevante de cara a la planificación del sistema eléctrico. Hacia el final del escenario, las

medidas de eficiencia incorporadas en el contexto E3.0 permiten que con una demanda eléctrica del mismo orden de magnitud que la del contexto BAU se alcance una cobertura eléctrica de la demanda de movilidad muy superior.

La figura 177 presenta los escenarios de evolución de la demanda energética en forma de combustible para cubrir la demanda de movilidad de viajeros. Como podemos ver, en el contexto BAU esta demanda es relativamente constante³⁴⁰ a lo largo de todo el escenario y

Figura 176. Escenarios de demanda de energía eléctrica para cubrir las demandas de movilidad de viajeros en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

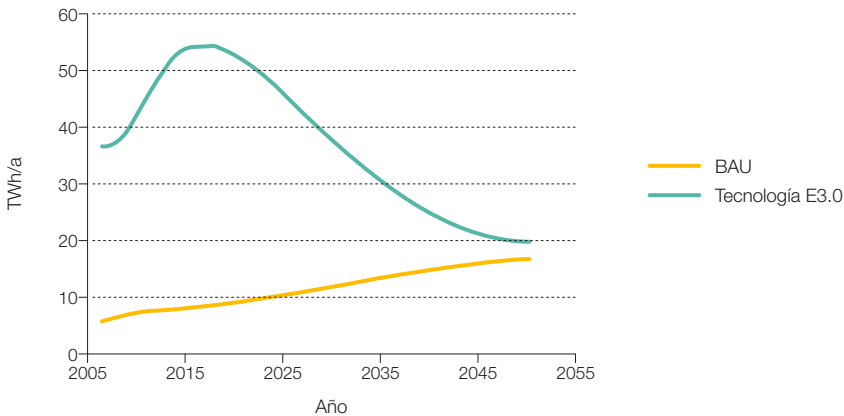
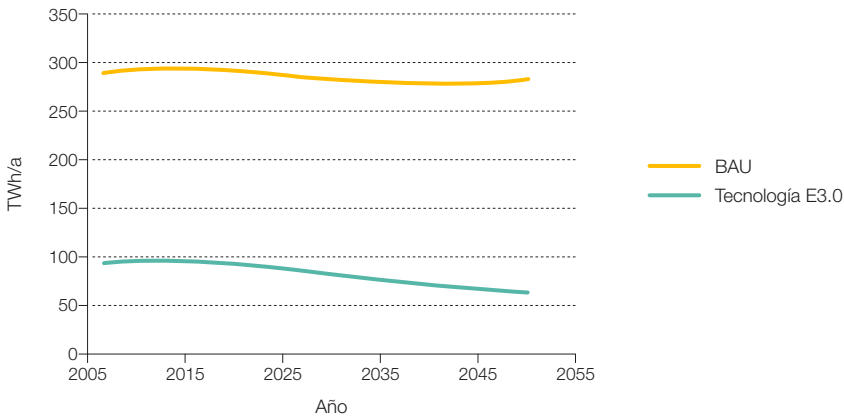


Figura 177. Escenarios de demanda de energía en forma de combustible para cubrir las demandas de movilidad de viajeros en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.



340 Como veremos más adelante en el proceso de calibrado, la demanda al principio del periodo analizado es menor, y se obtiene por tanto un escenario BAU con demanda creciente.

del orden de 283 TWh/a en 2050, un valor que ya alcanza los límites³⁴¹ del recurso de biomasa en la España peninsular.

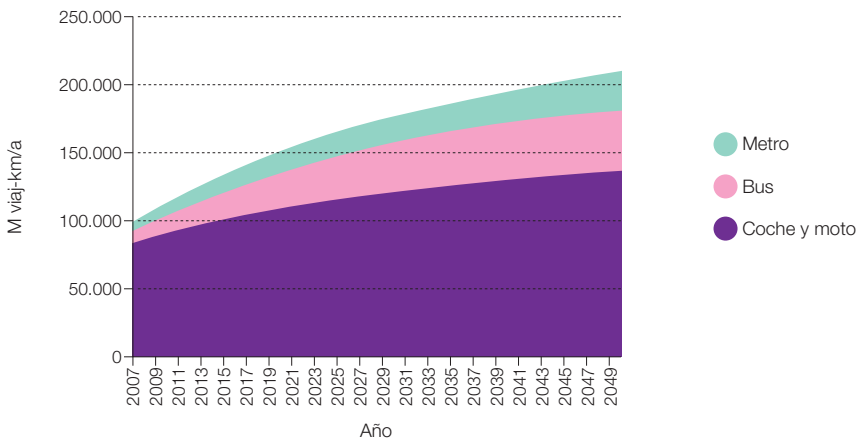
A continuación presentamos la estructura modal de la demanda energética asociada a la cobertura de demanda de movilidad de viajeros, obtenida según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte. Empezamos por presentar la estructura modal de la demanda de movilidad de viajeros absoluta. Las figuras 178 a 181 nos muestran la descomposición modal de la movilidad absoluta de viajeros, urbana e inurbana, para los contextos BAU y E3.0.

Por lo que respecta a la movilidad urbana, tanto en los contextos BAU como E3.0 vemos que es creciente a lo largo de todo el periodo considerado (aunque con tasas decrecientes), sin embargo, así como en el contexto BAU el modo dominante es el coche, que además opera basándose en combustible, en el contexto E3.0 se consigue desplazar hacia el autobús el peso dominante al final del escenario.

Pero es más, en el contexto E3.0, coches, motos y autobuses constituyen elementos integrantes de un mismo STI que ajusta el tamaño del vehículo a las características de la demanda de movilidad, y son todos ellos vehículos eléctricos.

Por lo que respecta a la demanda interurbana de movilidad de viajeros, también encontramos una tendencia creciente a lo largo de todo el escenario (aunque con tasas de crecimiento decrecientes). El contexto BAU se encuentra caracterizado por una participación creciente del modo aéreo, que acaba siendo el dominante, con el modo carretera en segundo lugar que cubre una cantidad aproximadamente constante de la demanda de movilidad total. En el contexto E3.0 el modo dominante es la carretera, creciente a lo largo del escenario, que junto al crecimiento del modo ferrocarril consiguen ir atenuando la parte de la demanda de movilidad cubierta por el modo aéreo. Con todo, el modo aéreo sigue siendo el segundo en importancia en el contexto E3.0.

Figura 178. Estructura modal de la demanda de movilidad absoluta urbana de viajeros para el contexto BAU.



341 En efecto, esta cantidad es superior al recurso total de la biomasa de origen de cultivos energéticos, cultivos forestales rápidos y aprovechamiento del monte bajo, que sin tener en cuenta los rendimientos de conversión a biocombustibles es en la España peninsular de 273 TWh/a. El recurso total de biomasa asciende a 426 TWh/a, lo cual implicaría que con un rendimiento total del 67% para la producción de biocombustibles (valor del orden del requerido para producir biodiesel, pero en el caso de bioetanol puede incluso ser inferior), requeriríamos ya emplear solo para la cobertura de la demanda de movilidad de viajeros el total del recurso disponible de biomasa en nuestro país, lo cual implicaría dedicar un 21,5% de la superficie del país a este abastecimiento energético.

A continuación, en las figuras 182y 183 presentamos la descomposición modal de la demanda energética asociada a la demanda de movilidad de viajeros, tanto para el contexto BAU como E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

En el contexto BAU vemos cómo la demanda de energía está dominada por los modos coche y avión, con el avión que incrementa el consumo energético a lo largo del tiempo y el coche lo reduce, para llegar al final del escenario con valores del mismo orden.

Figura 179. Estructura modal de la demanda de movilidad absoluta urbana de viajeros para el contexto E3.0 (coche, moto y autobús son eléctricos).

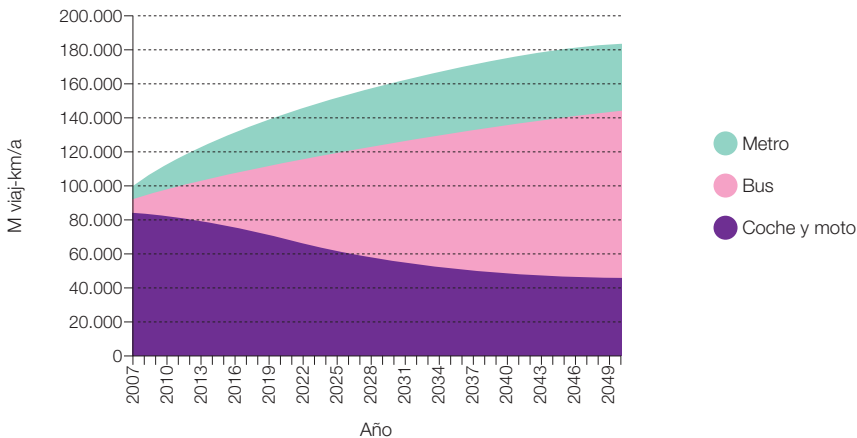
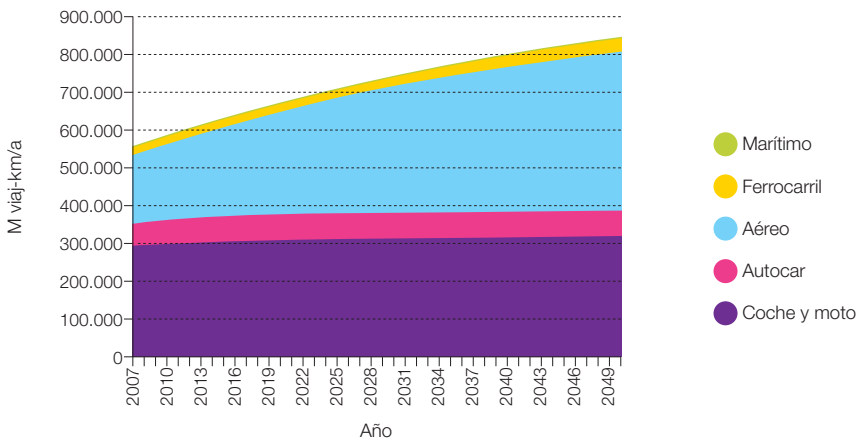


Figura 180. Estructura modal de la demanda de movilidad absoluta interurbana de viajeros para el contexto BAU.



En el contexto E3.0, la demanda energética está claramente dominada por el modo aéreo, y a pesar de la contracción que se consigue en este modo, al final del escenario el dominio energético del modo aéreo es absoluto. Esta es una indicación más de hasta qué punto el transporte aéreo de viajeros se

convierte en el aspecto más crítico de un contexto E3.0. Por último, resulta interesante analizar el consumo específico agregado del sector transporte para la cobertura del conjunto de la movilidad de viajeros.

La figura 184 nos presenta esta información.

Figura 181. Estructura modal de la demanda de movilidad absoluta interurbana de viajeros para el contexto E3.0 (coche, moto y autocar son eléctricos).

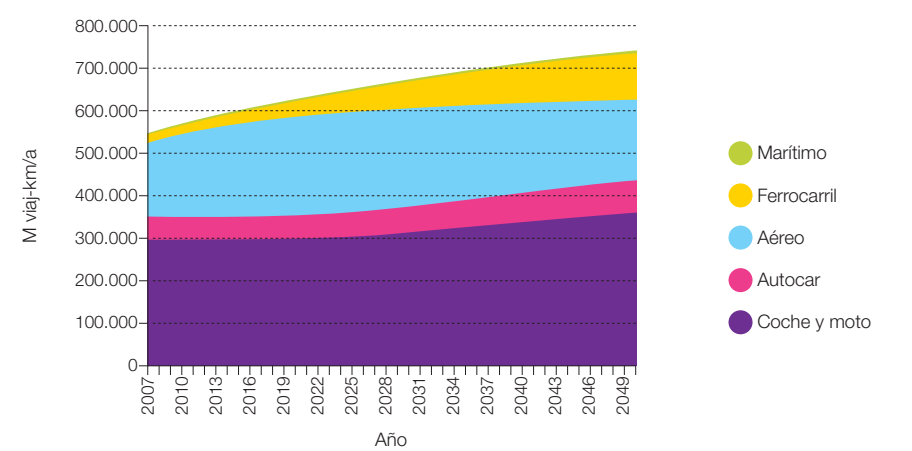


Figura 182. Estructura modal de la demanda de energía final asociada a la cobertura de la demanda de movilidad de viajeros en el contexto BAU.

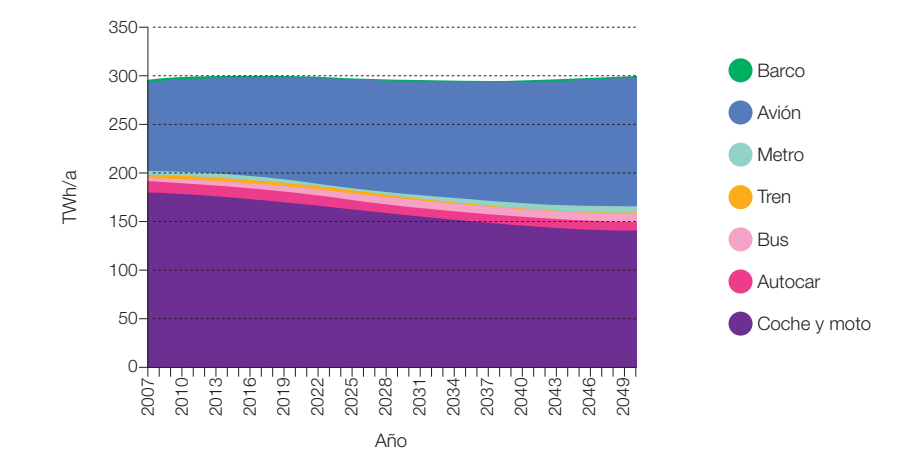


Figura 183. Estructura modal de la demanda de energía asociada a la cobertura de la demanda de movilidad de viajeros en el contexto E3.0.

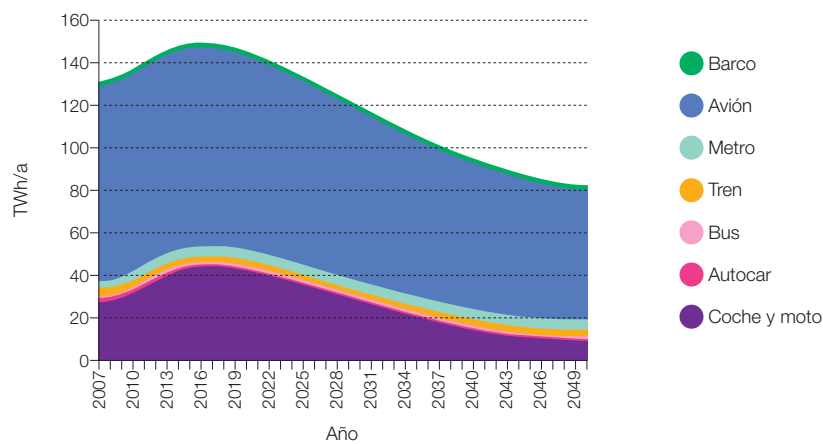
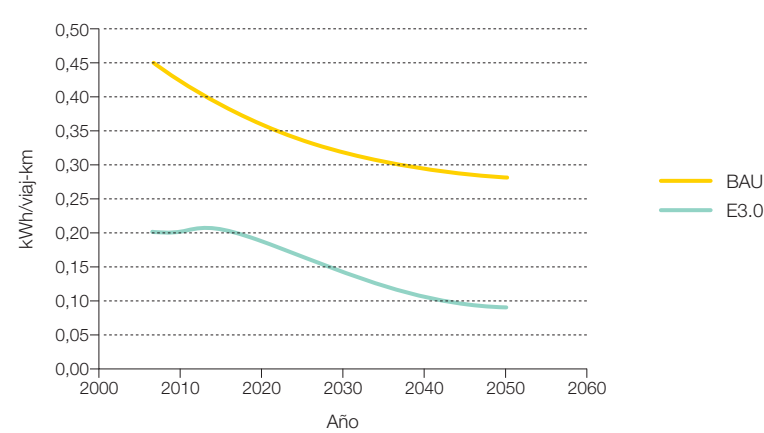


Figura 184. Evolución del consumo específico agregado del sector transporte para la cobertura del total de la demanda de movilidad de viajeros en los contextos BAU y tecnología E3.0.



3.6.4.2 Movilidad de mercancías

En la figura 185 podemos encontrar los escenarios resultantes de demanda de energía asociada a la cobertura de la demanda de

movilidad de mercancías, para los contextos BAU y tecnología E3.0. Las figuras 186 y 187 muestran la desagregación en demanda de energía para movilidad de mercancías urbana e interurbana.

Figura 185. Escenarios de demanda energética final asociada a la cobertura de la demanda de movilidad de mercancías en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

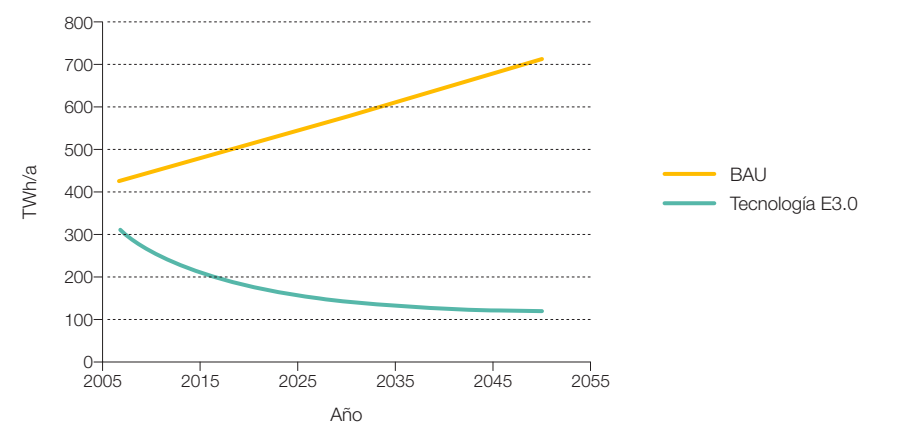


Figura 186. Escenarios de demanda energética final asociada a la cobertura de la demanda de movilidad urbana de mercancías en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

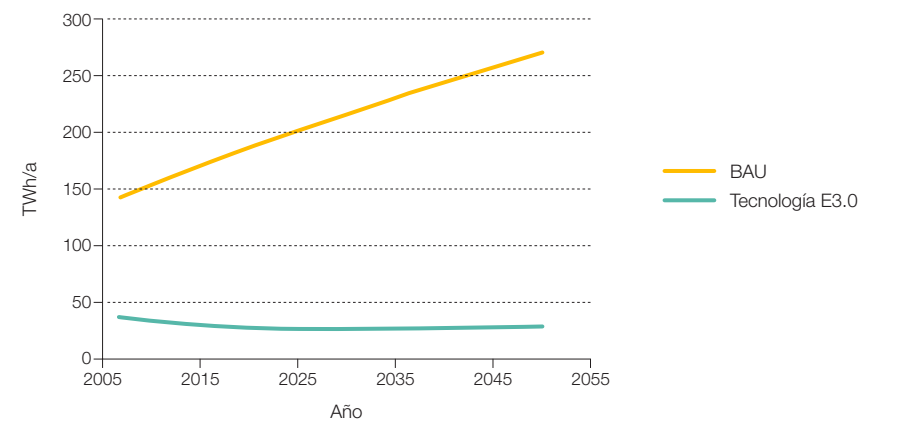


Figura 187. Escenarios de demanda energética final asociada a la cobertura de la demanda de movilidad interurbana de mercancías en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

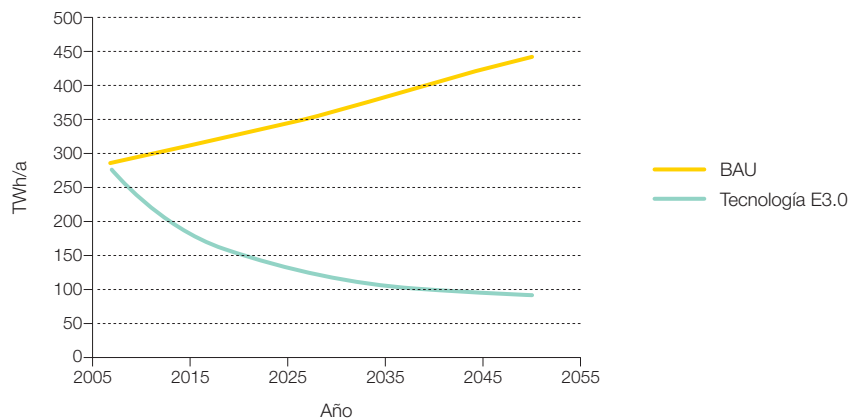
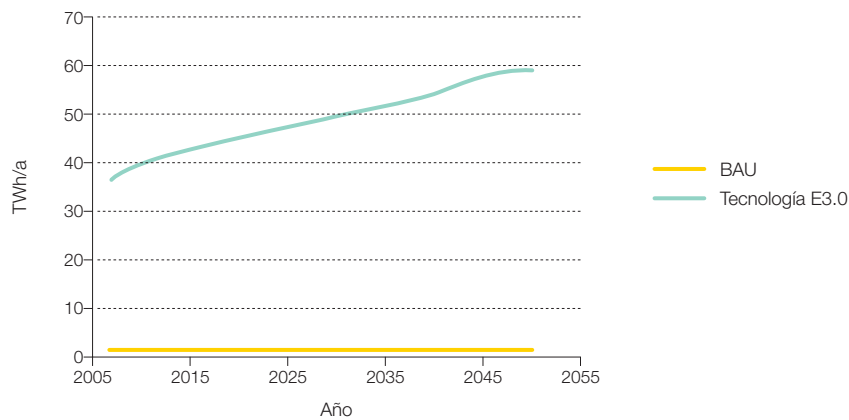


Figura 188. Escenarios de demanda de energía eléctrica asociada a la cobertura de la demanda de movilidad de mercancías en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.



Como podemos observar, el escenario BAU mantiene tasas crecientes, y aproximadamente constantes, a lo largo de todo el escenario, sin signo alguno de contracción. Por el contrario, en el contexto E3.0 se mantiene una contracción en la demanda de energía tendiente a la estabilización al final del escenario.

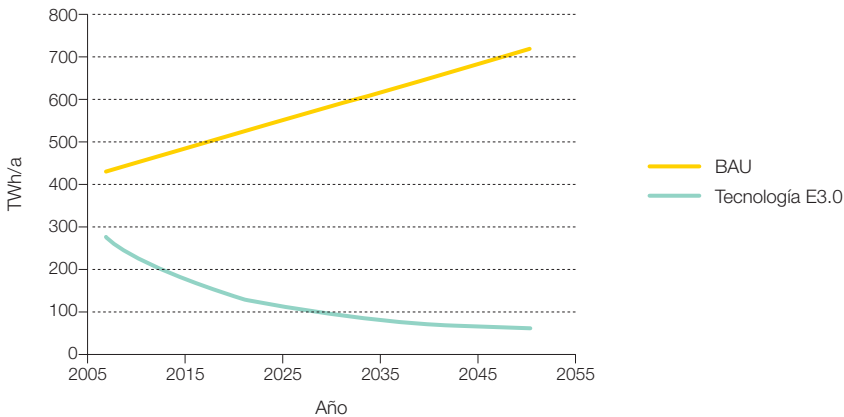
En las figuras 188 y 189 presentamos la desagregación de esta demanda de energía en términos de energía eléctrica y combustible. Como podemos ver, en el contexto BAU, la demanda de energía en forma de combustible para cubrir la demanda de movilidad de mercancías llega a superar al final del escenario los 713 TWh/a, una cantidad muy superior al recurso total de biomasa disponible³⁴², lo cual constituye una clara indicación de la insostenibilidad del contexto BAU³⁴³. En el caso del contexto E3.0, la demanda de energía en forma de combustibles para cubrir la demanda de movilidad de mercancías podría ser cubierta por el recurso de biomasa

disponible, y es la cantidad del potencial disponible que se debería emplear muy elevada al principio del escenario (del orden del 95%), y se reduce a algo del orden del 20% hacia el final del escenario. Estos porcentajes, añadidos a los asociados a la demanda de movilidad de viajeros, son ya muy elevados al tratarse del potencial máximo del recurso³⁴⁴, lo cual constituye una clara señal de que debe evitarse el uso del recurso biomasa en otros sectores³⁴⁵, que pueden acceder fácilmente a otros recursos renovables para cubrir su demanda energética.

Por lo que respecta a la desagregación por modos de la demanda de energía para cubrir la demanda de movilidad de mercancías, empezamos por recoger la estructura modal de la demanda de movilidad absoluta de mercancías.

La figura 190 nos muestra la demanda de movilidad de mercancías urbana, totalmente cubierta por el modo carretera. Tanto en los

Figura 189. Escenarios de demanda de energía en forma de combustible asociada a la cobertura de la demanda de movilidad de mercancías en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.



342 Si consideramos un rendimiento total de producción de los biocombustibles del orden del 67% (representativo de la producción de biodiésel), la demanda de combustibles para la cobertura de la demanda de movilidad de mercancías sería del orden del 250% del potencial total máximo de recurso de biomasa en la España peninsular (para cuya explotación sería preciso emplear el 21,5% de la superficie peninsular).

343 A pesar de los planteamientos optimistas y progresistas que hemos hecho para elaborar los escenarios BAU.

344 Que va asociado al 21,5% de área del territorio peninsular.

345 El sector edificación es un ejemplo típico. Como discutiremos en los capítulos dedicados al sector edificación, a pesar de que el uso de la biomasa por combustión directa es la forma más directa de cubrir la demanda térmica de este sector con renovables, las limitaciones de este recurso recomiendan proceder a la electrificación eficiente del sector edificación para poder acceder al recurso del resto de energías renovables.

contextos BAU como E3.0 se mantienen tasas de crecimiento positiva (aunque decrecientes) a lo largo del escenario, sin alcanzar una saturación.

Las figuras 191 y 192 presentan la estructura modal de la demanda de movilidad interurbana

de mercancías para los contextos BAU y E3.0. Como podemos ver, en ambos escenarios esta demanda de movilidad está dominada por el transporte por carretera, si bien, así como en el contexto BAU la atenuación del crecimiento anual de la demanda de movilidad de mercancías por carretera es

Figura 190. Escenarios de demanda de movilidad urbana de mercancías en los contextos BAU y E3.0.

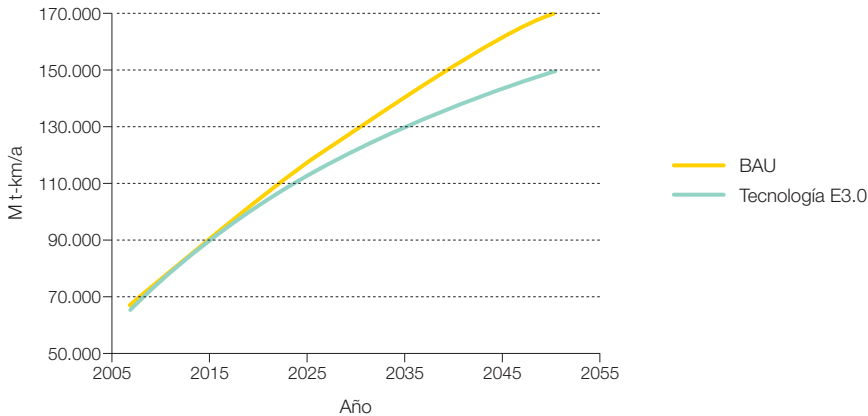
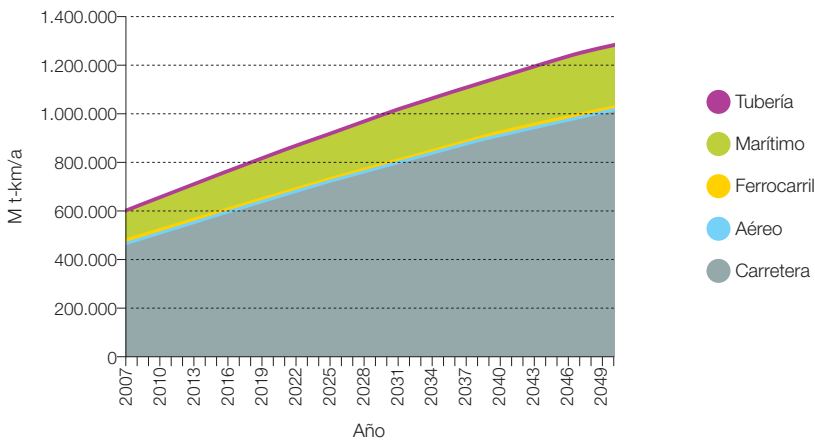


Figura 191. Estructura modal del escenario de demanda de movilidad interurbana de mercancías en el contexto BAU.



prácticamente inexistente, en el contexto E3.0 se consigue estabilizar hacia el final del escenario la demanda de movilidad por este modo de transporte.

Por último, las figuras 193 y 194 recogen la estructura modal de la demanda de energía asociada a la cobertura de demanda de movilidad de mercancías en los contextos BAU y

Figura 192. Estructura modal del escenario de demanda de movilidad interurbana de mercancías en el contexto E3.0.

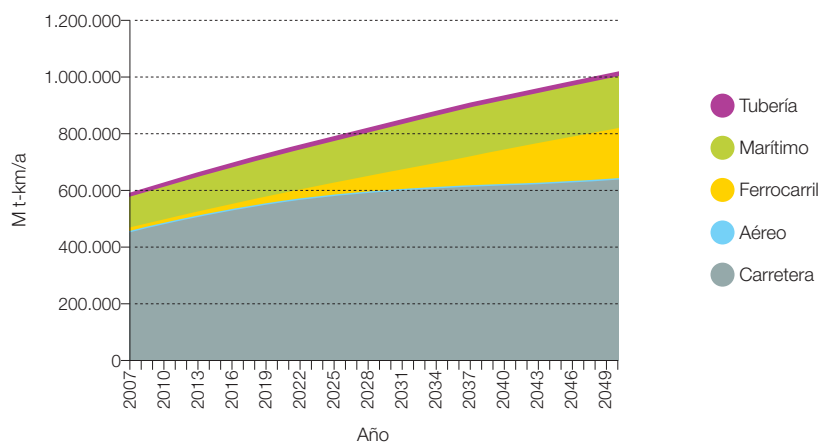
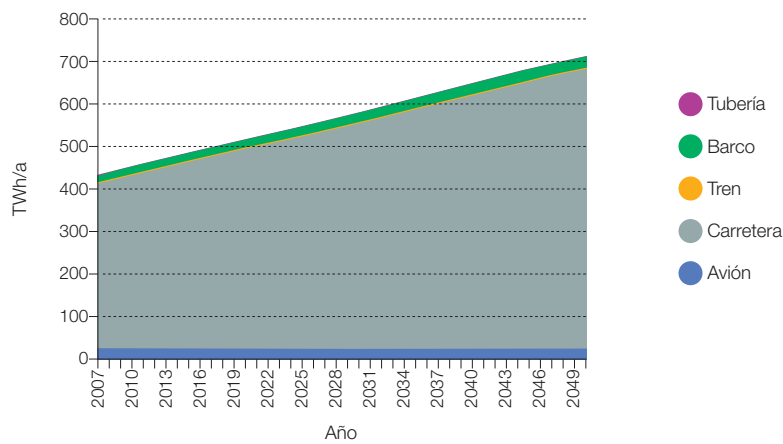


Figura 193. Estructura modal de la demanda de energía final para la cobertura de la demanda de movilidad de mercancías en el contexto BAU, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.



E3.0. En ambos casos, el modo carretera es el dominante en dicha demanda de energía, pero así como en el contexto BAU el modo carretera no muestra signo alguno de contracción en lo que respecta a la demanda de energía, en el contexto E3.0 si que se obtiene

una importante contracción de la demanda de energía de este modo, que es la principal responsable de la contracción total en la demanda de energía para movilidad de mercancías, y todo ello a pesar de la limitada contracción de la demanda de movilidad.

Figura 194. Estructura modal de la demanda de energía para la cobertura de la demanda de movilidad de mercancías en el contexto E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

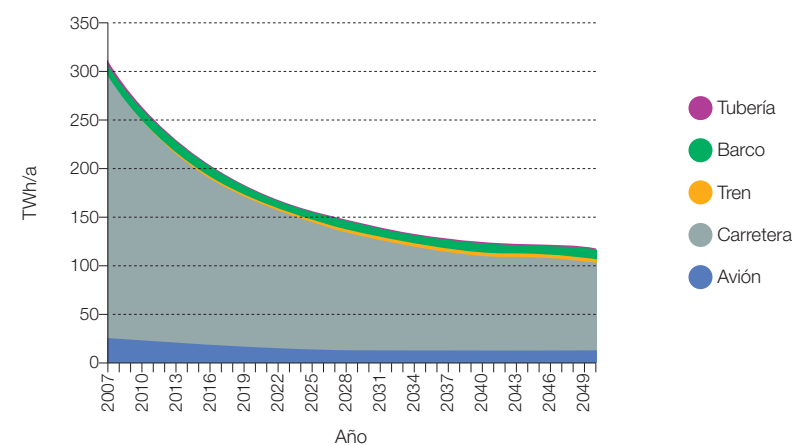
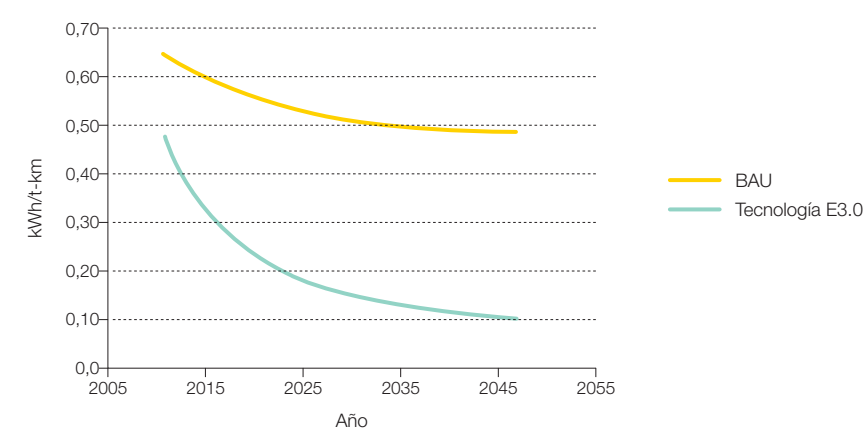


Figura 195. Consumo específico agregado del sector transporte para la cobertura de la demanda de movilidad total de mercancías, en los contextos BAU y tecnología E3.0.



Por último, la figura 195 recoge la evolución del consumo específico agregado del sector transporte para la cobertura de la demanda de movilidad total de mercancías, en el contexto BAU y E3.0.

3.6.4.3 Movilidad total

En este punto recopilamos los escenarios totales de demanda de energía para el sector transporte (movilidad de viajeros y mercancías) en los contextos BAU y tecnología E3.0.

La figura 196 nos presenta los escenarios resultantes de demanda total de energía³⁴⁶ para el sector transporte. Los puntos de partida de ambos escenarios (727 TWh/a para el BAU y 440 TWh/a) dejan en su interior³⁴⁷ el valor indicado por (AIE, 2007) de 450 TWh/a. Como podemos observar en estas figuras, el contexto BAU, a pesar de los enfoques optimistas empleados para la elaboración de sus escenarios, conduce a un escenario tendencial con tasas de crecimiento prácticamente constantes a lo largo de todo el periodo analizado, lo que conduce a una demanda de energía final para los últimos años del periodo considerado por encima de los 1000 TWh/a. Esta cantidad de energía es muy elevada, y si tenemos en cuenta que los escenarios BAU para los otros sectores (edificación e industria) pueden conducir a cantidades de este orden, nos indican claramente la insostenibilidad de los planteamientos BAU-optimistas planteados en este estudio. Por tanto una conclusión evidente es que resulta imprescindible trascender los planteamientos BAU y colocarse en la línea de los escenarios E3.0.

En el contexto E3.0, a pesar de asumir demandas de movilidad sin una contracción importante, las medidas de eficiencia, la elección de las tecnologías apropiadas, y la puesta en marcha de mecanismos de organización y

estructuración inteligentes, nos permiten acceder a un escenario de contracción energética continua en todo el periodo considerado, tendiendo hacia la estabilización al final del escenario, en cuyo instante presenta una demanda de energía final que es un 20% de la del escenario BAU. Con todo, seguimos hablando de una demanda del orden de 200 TWh/a que sigue siendo una cantidad importante de energía.

Las figuras 197 y 198 nos muestran la desagregación de esta demanda total de energía del sector transporte entre los ámbitos urbano e interurbano³⁴⁸, pudiendo contrastar como es, especialmente en el ámbito interurbano donde el contexto E3.0 permite acceder al escenario global de contracción mantenida.

Las figuras 199 y 200 nos muestran la desagregación entre demanda eléctrica y demanda en forma de combustible. Como podemos observar, el contexto E3.0 domina en cuanto a demanda eléctrica, con un pico interior en torno al año 2018 que supera los 100 TWh/a (algo superior a la tercera parte de la demanda eléctrica actual sobre el sistema eléctrico), para posteriormente estabilizarse en valores del orden de los 80 TWh/a, todo ello perfectamente dentro de las posibilidades³⁴⁹ de un sistema eléctrico basado en energías renovables. Pero la conclusión más interesante la obtenemos al observar los escenarios de demanda de energía en forma de combustible, que para el caso BAU nos conducen a una demanda del orden de los 1000 TWh/a hacia el final del escenario y sin ningún signo de estabilización. Una buena “medida” de la insostenibilidad de este contexto BAU la podemos obtener al comparar esta demanda de combustibles con la que tendríamos capacidad de producir en nuestro país basándose en el potencial de biomasa disponible³⁵⁰, en cuyo caso nos damos cuenta de que la

346 Nótese que se trata de energía final y no primaria, en términos de la electricidad y combustibles necesarios para cubrir la demanda de movilidad.

347 El hecho de que el punto de partida de nuestro escenario BAU sea superior al valor de la AIE para el año 2006 se debe en parte a que nosotros hemos incorporado el 50% de la movilidad exterior. Pero adicionalmente hay una serie de incertidumbres en los datos de entrada del modelo desarrollado que se acotarán en el siguiente apartado dedicado al calibrado.

348 Recordemos que el ámbito interurbano incluye el 50% de la demanda de movilidad exterior.

349 El potencial peninsular de generación eléctrica de origen renovable es de 15800 TWh/a (GP, 2005).

350 El potencial de biomasa disponible es de 426 TWh/a al incluir todas las formas de biomasa, y de 273 TWh/a si nos limitamos a los cultivos energéticos, los cultivos forestales de rotación rápida y el aprovechamiento del monte bajo. Para explotar este potencial sería necesario emplear el 21,5% de la superficie del territorio peninsular (GP, 2005).

demanda de combustibles en el contexto BAU es del orden del 350% de los biocombustibles³⁵¹ que podríamos generar al explotar el máximo potencial de la biomasa en nuestro

país. Para el contexto BAU, la situación es considerablemente más favorable, a pesar de lo cual, al final del escenario³⁵² todavía requeriríamos explotar más del 42% del máximo

Figura 196. Escenarios de demanda de energía para la cobertura del total de la demanda de movilidad (viajeros y mercancías) en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

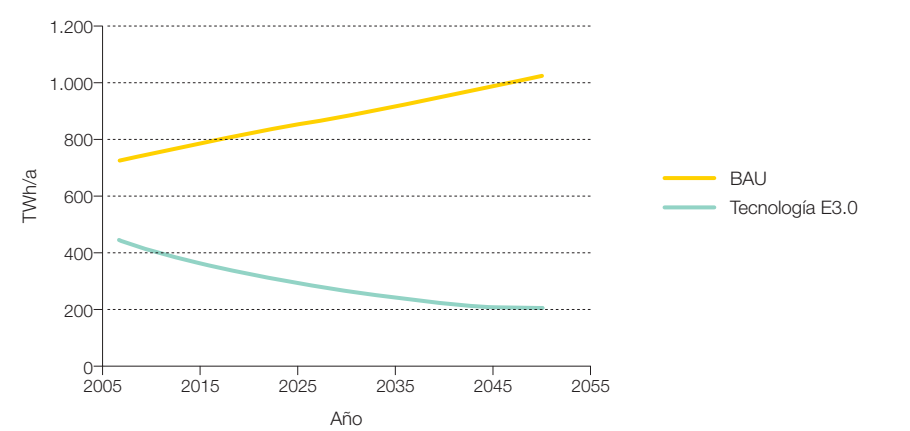
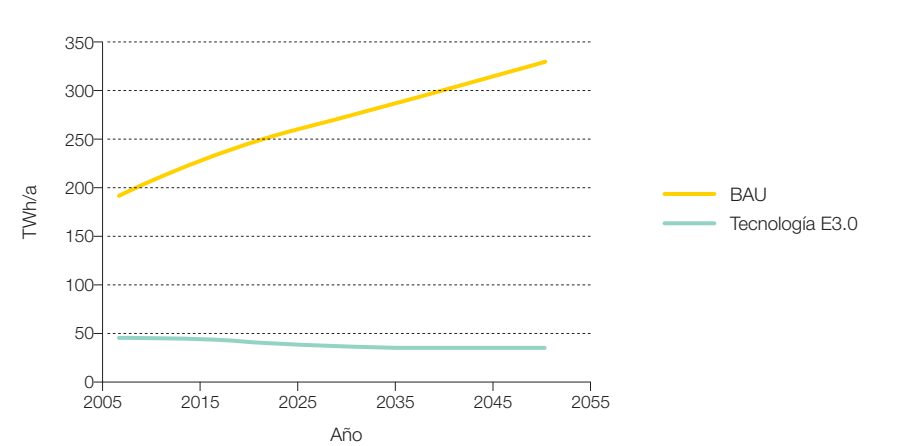


Figura 197. Escenarios de demanda de energía para la cobertura del total de la demanda de movilidad urbana (viajeros y mercancías) en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.



³⁵¹ Suponiendo un rendimiento global de producción de los biocombustibles a partir de la biomasa del 67%, representativo de un biodiésel.

³⁵² De hecho, durante los primeros años del escenario en el contexto E3.0 todavía nos sería preciso explotar más del 100% de los recursos de biomasa disponible si quisiéramos cubrir esta demanda con biomasa, lo cual nos obligaría a importar biomasa del exterior durante los primeros años. La diferencia fundamental con el caso BAU, es que en el contexto E3.0 esta situación sería transitoria, y nos conduciría a lo largo del desarrollo del escenario hacia unas condiciones más sostenibles.

potencial de la biomasa en nuestro país. Incluso este porcentaje, para el contexto E3.0, resulta ya muy elevado tratándose del máximo potencial del recurso, que además requiere

emplear un porcentaje elevado del territorio nacional. Por tanto, podemos concluir que incluso dentro del contexto E3.0 es preciso evitar en la medida de lo posible el uso de la

Figura 198. Escenarios de demanda de energía para la cobertura del total de la demanda de movilidad interurbana (viajeros y mercancías) en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

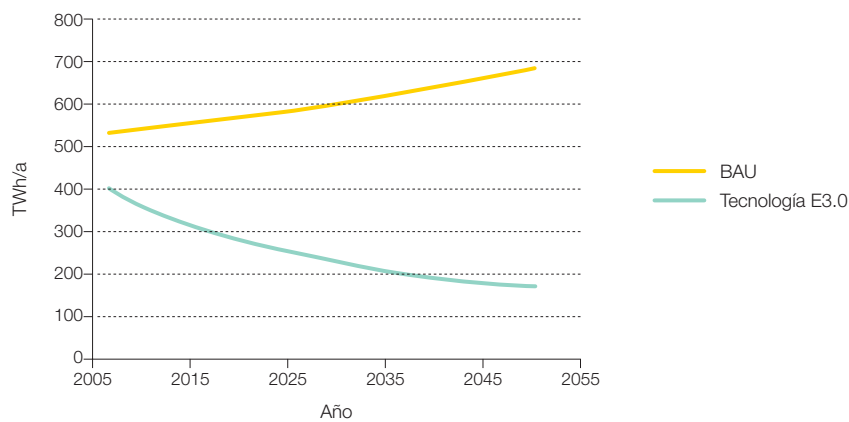


Figura 199. Escenarios de demanda de energía eléctrica para la cobertura del total de la demanda de movilidad (viajeros y mercancías) en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

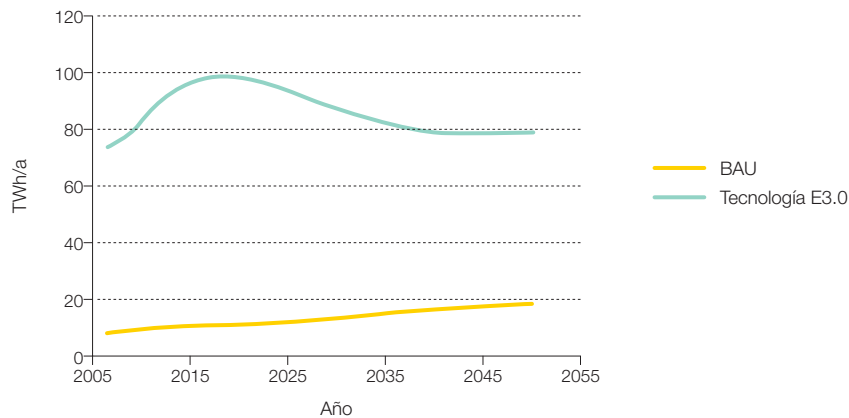
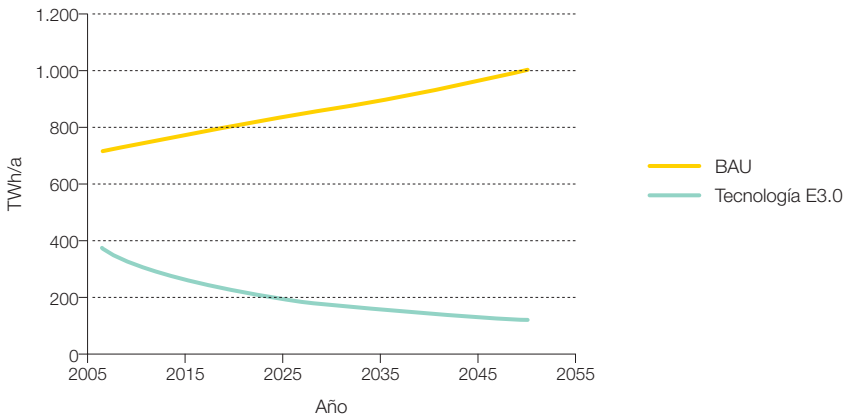


Figura 200. Escenarios de demanda de energía en forma de combustible para la cobertura del total de la demanda de movilidad (viajeros y mercancías) en los contextos BAU y tecnología E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.



biomasa para cubrir la demanda energética de los otros sectores (edificación e industria), buscando en ellos otras soluciones que permitan acceder al conjunto del potencial de las energías renovables de la forma más eficiente³⁵³.

En las figuras 201 y 202 presentamos la desagregación modal de los escenarios de demanda energética total (viajeros y mercancías) del sector transporte en los contextos BAU y tecnología E3.0.

Como podemos observar, en ambos contextos la demanda dominante es la debida al transporte por carretera, si bien en el contexto BAU esta predominancia se sigue acentuando al pasar el tiempo, mientras en el contexto E3.0 se consigue contraer significativamente esta demanda de tal forma que hacia el final del escenario, si bien sigue siendo la mayor demanda modal, pero ya es del mismo orden de magnitud que la correspondiente al modo aéreo. En este sentido, la estructura modal de la demanda energética del contexto

E3.0 al final del escenario considerado, parece mucho más equilibrada que para el caso BAU. Es de resaltar que la gran contracción de la demanda energética del modo carretera, experimentada en el contexto E3.0, es principalmente debida a la transición tecnológica hacia la tracción eléctrica y a la implementación de un STI capaz de incrementar significativamente los CF de los vehículos utilizados, quedando la migración modal en un segundo plano³⁵⁴, y con escenario de demanda creciente de movilidad total.

El modo aéreo es el segundo en importancia en términos de demanda energética para ambos contextos. En el contexto BAU la demanda energética de este modo va creciendo a lo largo del tiempo, mientras que en el contexto E3.0 se consigue contraer gradualmente la demanda energética de este modo a lo largo del escenario, si bien su contracción es mucho más limitada que la alcanzada en el modo carretera debido a la rigidez tanto de la demanda de movilidad que cubre, como de la tecnología energética empleada (MCI).

353 A menudo esto está asociado a la electrificación y la integración del sistema energético. En el sector de la edificación, esta electrificación eficiente va asociada a la implementación de las bombas de calor, pero en el sector de la industria, los niveles de temperatura más elevados pueden obligar a emplear la electrificación directa por efecto Joule de parte de la demanda térmica (que siempre será más eficiente que el uso del hidrógeno como vector intermedio).

354 De hecho, la migración modal va en dirección contraria a la reducción de demanda de energía del modo carretera para la movilidad de viajeros en el contexto E3.0, si bien por lo que respecta a la movilidad de mercancías sí que se reduce la participación modal de la carretera.

Figura 201. Escenarios de desagregación modal de la demanda energética total (viajeros y mercancías) del sector transporte en el contexto BAU, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.

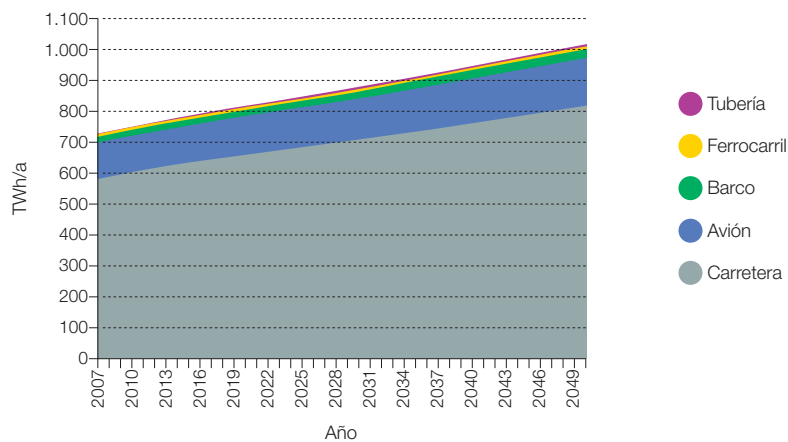
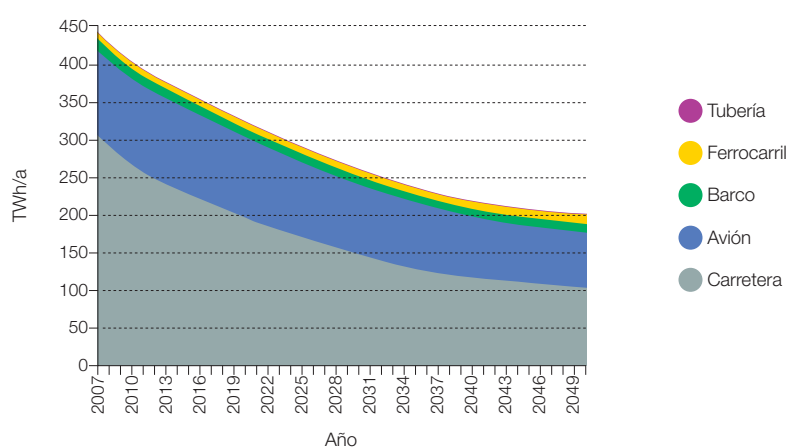


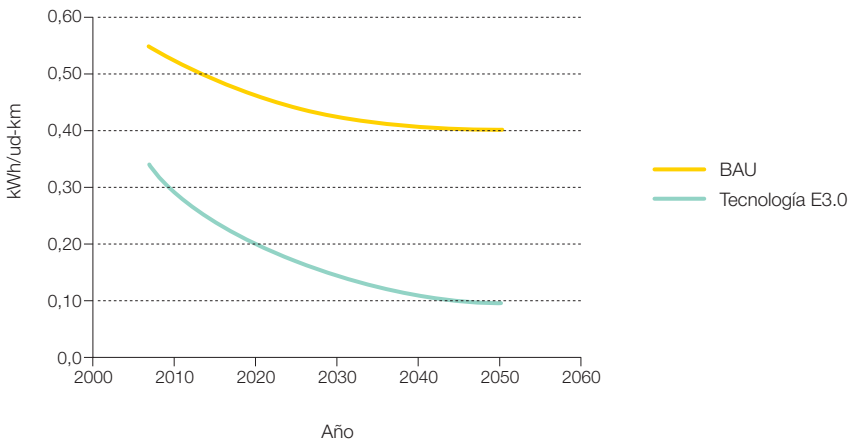
Figura 202. Escenarios de desagregación modal de la demanda energética total (viajeros y mercancías) del sector transporte en el contexto E3.0, según los inputs de movilidad y consumos específicos en el modelo energético del sector transporte.



El modo marítimo mantiene un tercer lugar ya muy distanciado de los dos modos dominantes desde el punto de vista del consumo energético, que en el caso del contexto E3.0 acaba cediendo ese tercer lugar

al modo ferrocarril hacia el final del escenario. Por último, en la figura 203 reproducimos la evolución del consumo específico agregado del conjunto del sector transporte para la cobertura de toda la demanda de movilidad de

Figura 203. Consumo específico agregado del conjunto del sector transporte para la cobertura del total de movilidad de viajeros y mercancías, según los contextos BAU y E3.0.



viajeros y mercancías³⁵⁵. Es de destacar que la carencia de datos oficiales desagregados dificulta mucho el proceso de calibrado, y fuerza a emplear datos agregados como el indicador mostrado en esta figura. Como podemos observar, tanto para el contexto BAU como para la tecnología E3.0 el consumo específico agregado se va reduciendo a lo largo del escenario, proporcionado la tecnología E3.0 un potencial de reducción superior al ratio 4:1 de cara al año 2050.

3.6.5 Calibrado del modelo de demanda de energía en el sector transporte

En este punto vamos a presentar un ejercicio de calibrado del modelo energético del sector transporte que hemos desarrollado, con el fin de proyectar la estructura de consumos energéticos de este sector hacia el año 2050 en dos contextos tecnológicamente muy distintos: BAU y E3.0.

En primer lugar conviene recalcar las ventajas de un modelo energético del sector transporte estructurado de abajo a arriba, que parte de la demanda de servicios de movilidad y de las características de las tecnologías para cubrir las, y permite evaluar la correspondiente demanda energética. A diferencia de los modelos macro que correlacionan dicha demanda de energía con indicadores globales tipo PIB, la aproximación de abajo arriba es capaz de reflejar con fidelidad el efecto de modificaciones estructurales como las que tanteamos en este estudio, tanto en el campo de la tecnología como en el de la inteligencia.

El objetivo final del modelo que hemos desarrollado era generar predicciones de la demanda de energía en ambos contextos para el año 2050, y es poco relevante desde el punto de vista de este estudio la evolución desde el instante de partida hasta 2050. Sin embargo, resulta interesante analizar los efectos del proceso de transición (siguiente apartado), así como los resultados correspondientes al

355 En este caso agregado, la movilidad la medimos como M ud-km/a, y son las unidades la suma de los viajeros y las toneladas: ud = viaj + t.

instante de partida³⁵⁶ en relación a la información oficial disponible.

El modelo energético desarrollado parte de la caracterización de dos variables independientes principales: demanda de movilidad y consumos específicos de las distintas tecnologías consideradas. Y de acuerdo con ellas genera un resultado principal: consumo de energía final del sector transporte.

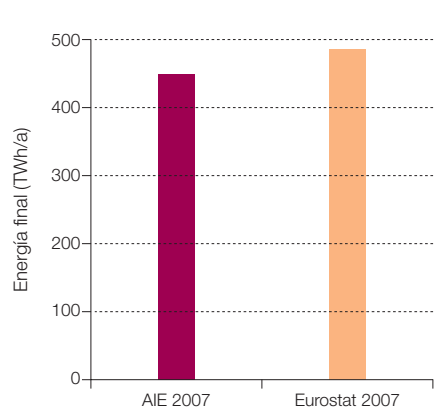
Ante cualquier modelo matemático que trata de reproducir los efectos de una variable dependiente (consumo de energía final) a partir de una serie de variables independientes (movilidad y consumos específicos), resulta conveniente proceder al calibrado de los resultados del modelo con datos “reales” disponibles con el fin de poder ajustar el error que se haya podido propagar en el modelo como consecuencia de las incertidumbres asociadas a los datos de partida. En el caso de que los datos “reales” también contengan una incertidumbre importante, el propio proceso de calibrado puede permitir extraer algunas conclusiones sobre esos datos “reales”.

La dificultad para proceder a un calibrado del modelo de consumo energético en el sector transporte es la gran escasez de datos oficiales, que son los que podríamos considerar como “reales” en este caso, y de su elevada incertidumbre.

Por lo que respecta al resultado principal del modelo, el consumo de energía, las fuentes de datos oficiales con las que contamos son los datos estadísticos publicados por la AIE y Eurostat, datos que estos organismos internacionales recopilan de las administraciones nacionales, que son en última instancia las responsables de su elaboración. Este dato se proporciona de forma muy agre-

gada³⁵⁷, y sin que exista una transparencia sobre los métodos empleados para configurarlo y por tanto de su alcance real. Por si esto fuera poco, los datos proporcionados por AIE y Eurostat no coinciden tal y como podemos observar en la figura 204. Es decir: la caracterización energética de la situación “real” del sector transporte dista de ser completa y contiene incertidumbres importantes.

Figura 204. Consumo de energía final del sector transporte durante el año 2007 según datos de AIE y de Eurostat.



A priori cabe esperar que el error contenido en la caracterización de la situación “real” del sector transporte sea, por defecto, infravalorando su impacto energético real, debido a que el principal origen de este error estará asociado a componentes del consumo energético sectorial que no hayan sido recogidos, o que hayan sido insuficientemente caracterizados en la metodología seguida para elaborar ese indicador de consumo total agregado. A este respecto resulta relevante recalcar el gran error detectado en la recopilación de información de demanda de movilidad³⁵⁸ por parte de Eurostat. En esta, para el modo dominante de movilidad de mercancías

356 El instante de partida donde arranca el desarrollo del modelo energético es el correspondiente al último año con datos oficiales, es decir, el fin de las series históricas en las que se basa el desarrollo del modelo, que en nuestro caso es el año 2007, por ser éste el último año en el que se disponía de información oficial de todos los datos necesarios cuando se procedió al desarrollo del modelo.

357 Consumo total del sector transporte, sin separar orígenes de demanda de movilidad (viajeros, mercancías).

358 Cuyo origen es el mismo para la caracterización energética: la administración nacional.

(carretera) figura una demanda de movilidad que es del orden de un 62% de la que se desprende del procesado³⁵⁹ de los datos de los anuarios del Ministerio de Fomento, como consecuencia de un alcance parcial de las fuentes de demanda de movilidad reflejado en los indicadores procesados que se hacen llegar a Eurostat. En este sentido también resulta interesante recalcar la ausencia de caracterización de la demanda de movilidad de algunos modos relevantes en los datos recopilados por Eurostat.

Sin embargo, a pesar de toda esta incertidumbre en los valores oficiales que caracterizan al sector transporte, nos ha parecido interesante desarrollar el proceso de calibrado.

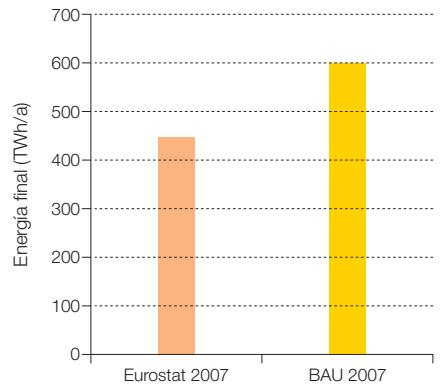
El primer punto a tener presente, para interpretar estos resultados de calibrado, es que el modelo energético que nosotros hemos desarrollado incluye un 50% del consumo energético debido a movilidad exterior. Puesto que este componente todavía está mucho menos caracterizado que el del consumo debido a la movilidad interior, lo hemos dejado fuera del proceso de calibrado. Por tanto, el punto elegido para el calibrado es el año 2007, y su alcance el del consumo energético para cubrir la demanda de movilidad interior. Por otro lado, puesto que el modelo está desarrollado para la España peninsular y los datos oficiales supuestamente corresponden al conjunto de España, hemos adaptado los resultados “oficiales” proporcionalmente³⁶⁰ a la población para extrapolarlos a la España peninsular.

Como datos oficiales en los que basar el proceso de calibrado hemos elegido como dato principal el consumo total de energía final proporcionado por Eurostat, y como dato adicional, necesario para completar el proceso de calibrado con la información

disponible, hemos elegido el consumo específico agregado del conjunto del sector transporte que se deduce de los datos presentados en relación al escenario de referencia de la E4 (MINECO, IDAE, 2003)³⁶¹. En las figuras 205 y 206 comparamos los resultados proporcionados por el modelo energético del sector transporte y los “oficiales” que vamos a emplear para su calibrado. Como podemos ver, el consumo de energía final obtenido con el modelo para el año 2007 es superior al reflejado por la referencia “oficial”, lo cual, asumiendo temporalmente para el proceso de calibrado que la referencia oficial refleja el valor real de dicho consumo, podría ser debido a dos causas:

- Menor demanda de movilidad que la empleada como dato de entrada en el modelo.
- Menor consumo específico de las tecnologías empleadas para cubrir la demanda de movilidad respecto a las introducidas en el modelo.

Figura 205. Comparación de los resultados del modelo y la referencia “oficial” empleada para el calibrado: energía final total.



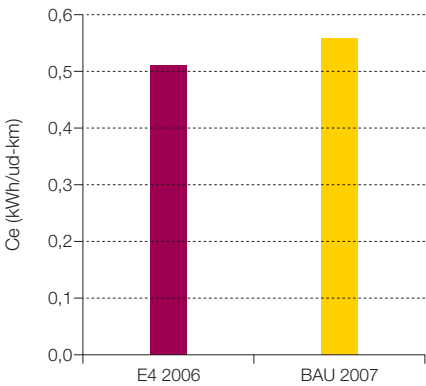
359 El origen de esta discrepancia lo identificamos en que los datos procesados que aparecen en el Ministerio de Fomento incluyen tan solo la movilidad en la red de carreteras propiedad del estado, del orden del 50% de la total. Consecuentemente, si este dato incompletamente procesado llega a Eurostat, se refleja como un total nacional cuando realmente se ha dejado fuera prácticamente la mitad de ese origen de demanda de movilidad.

360 Sin duda esto introduce una incertidumbre adicional, que a priori es de esperar que sea en la dirección de infravalorar la previsión “oficial” de consumo energético peninsular.

361 Debemos señalar que la incertidumbre sobre este dato es muy elevada. En primer lugar porque corresponde al año 2006 mientras que el calibrado se está desarrollando para el año 2007. En segundo lugar porque corresponde a la proyección que en 2003 hizo el IDAE para desarrollar la E4, y por tanto no da un dato real. Y por último, porque como hemos comentado ya en otras ocasiones, en (MINECO, IDAE, 2003) se aprecian divergencias muy importantes respecto a otros escenarios.

El resultado de la figura muestra que en efecto hay, asumiendo temporalmente para el proceso de calibrado que la referencia oficial refleja el valor real de dicho parámetro, un error por exceso, lo que indicaría que las tecnologías empleadas para cubrir la demanda de movilidad en el año 2007 son más eficientes de lo que se reflejó como entrada en el modelo.

Figura 206. Comparación de los resultados del modelo y la referencia “oficial” empleada para el calibrado: consumo específico agregado (ud = viaje + t).



Sin embargo, el mayor error potencial parece estar localizado en la demanda de movilidad realmente cubierta por el sistema de transporte en el año 2007. El modelo energético del sector transporte se alimenta con una proyección de la demanda de movilidad elaborada a partir de los datos históricos disponibles hasta el año 2007, por lo que en el punto de calibrado, los datos de movilidad empleados por el modelo se corresponden con la serie histórica.

Sin embargo, tal y como indicamos anteriormente, la caracterización histórica de la

demanda de movilidad es bastante deficiente, lo cual nos obligó a completar los datos históricos disponibles para disponer de series completas con las que poder proyectar la evolución de la demanda de cara al año 2050.

Pero es que además, la propia estimación de la demanda de movilidad histórica contiene un error potencial muy elevado al evaluarse de forma indirecta a partir de otras variables. De hecho, a este respecto conviene señalar que a priori cabría esperar que el error en la evaluación histórica de los datos de movilidad fuera por defecto³⁶², dada la parcialidad de los orígenes de la demanda de movilidad que se recogen en los datos oficiales, y la valoración por defecto de los indicadores indirectos empleados para estimar la demanda de movilidad³⁶³.

A todo esto se añade el hecho de que las series históricas completadas se han empleado para generar proyecciones hacia el año 2050 de las tendencias de evolución de la movilidad, y en estas proyecciones, el paso fidedigno por el año 2007 de partida resultaba mucho menos relevante que el recoger la tendencia de evolución adecuada de cara al año 2050.

Basándose en un análisis de errores a partir de los resultados disponibles y parámetros de calibrado empleados, hemos evaluado una estimación del error asociado a la demanda de movilidad. La figura 207 recoge este error junto a las dos otras estimaciones de error obtenidas directamente de los datos “oficiales” de calibrado: energía final total y consumo específico agregado. Como podemos apreciar, efectivamente la demanda de movilidad es la principal responsable del error en el consumo de energía final.

³⁶² Es decir, que la demanda de movilidad fuera todavía mayor, lo cual conduciría a un consumo energético más elevado todavía como salida del modelo.

³⁶³ A este respecto es de resaltar por ejemplo los valores de tonelaje de los camiones empleados para estimar la movilidad de mercancías, que sistemáticamente parecen estar por debajo de los obtenidos a partir de las encuestas sobre básculas.

Figura 207. Resultados del análisis de errores que se derivan del proceso de calibrado, que proporcionan como información principal la estimación del error en la demanda de movilidad.

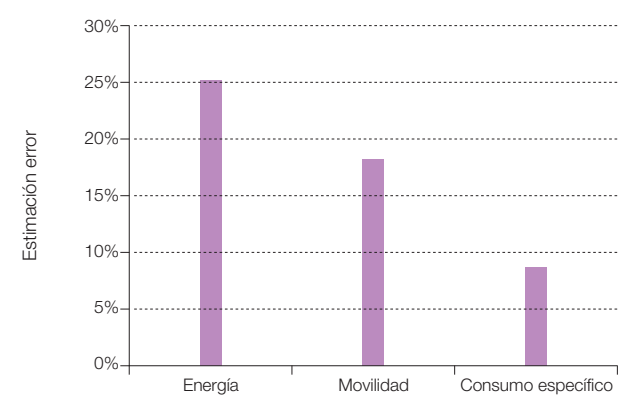
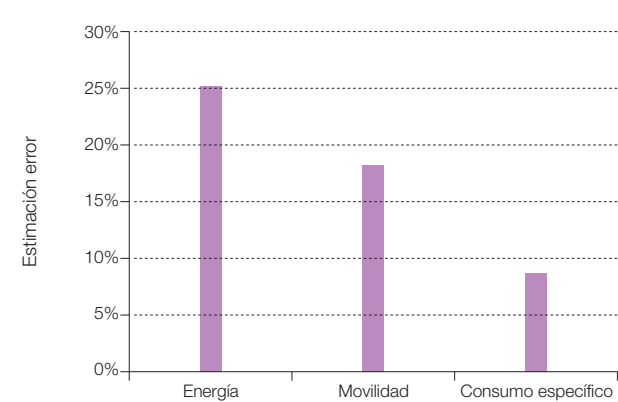


Figura 208. Estimación del error en términos de energía final para el sector transporte en el año 2007.



Según estas estimaciones de los errores en los distintos componentes, hemos elaborado una estimación de los errores en el consumo de energía final asociados al contexto BAU y E3.0 en el año 2007, que difieren, debido tanto a los ligeramente distintos niveles de demanda de movilidad, como sobre todo a los valores significativamente inferiores de consumo específico para la tecnología E3.0 (que

además no están sujetas al error en el consumo específico agregado). Los resultados se encuentran recogidos en la figura 208.

Vamos a asumir este error estimado durante el proceso de calibrado como un error inicial a corregir sobre los resultados del modelo para el año 2007. Sin embargo, creemos que hay argumentos suficientes como para cuestionar

que los datos oficiales de consumo de energía final en el sector transporte caractericen completamente las implicaciones energéticas de este sector en nuestro país.

De cualquier forma, todas las incertidumbres que conducen a este posible error en los datos introducidos en el modelo energético

(demanda de movilidad, consumos específicos de las distintas tecnologías, y evaluación oficial del consumo de energía final total para el sector transporte), se van diluyendo a medida que avanzamos por el periodo de tiempo considerado, alejándonos de la situación concreta en el año 2007 y adoptando las evoluciones tendenciales de los escenarios

Figura 209. Factor de atenuación del error inicial en el consumo de energía final.

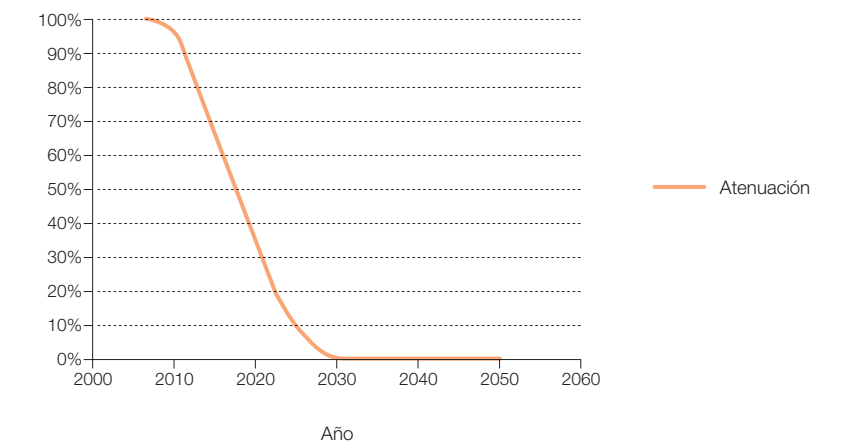
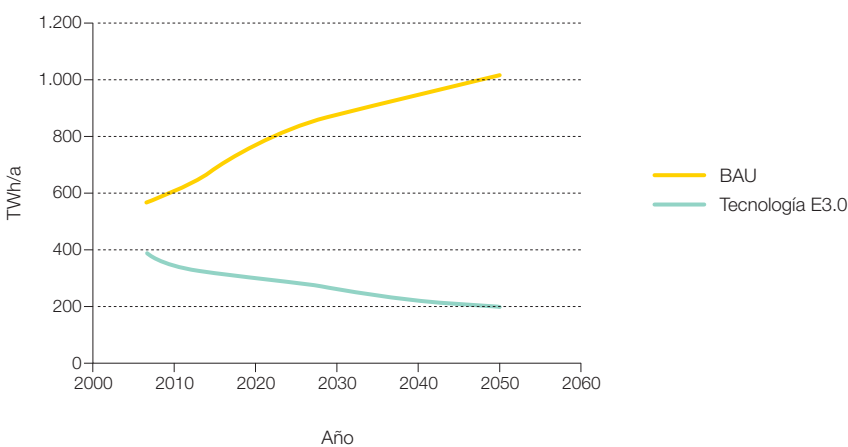


Figura 210. Evolución de la demanda total de energía final del sector transporte para los contextos BAU y tecnología E3.0. Situación postcalibrado.



proyectados. Por este motivo, y de cara tan solo a proporcionar una estimación del proceso de evolución, vamos a introducir un factor de atenuación para incorporar este efecto a lo largo del desarrollo del escenario. El planteamiento que hemos hecho es que para el año 2030 ya se ha diluido com-

pletamente el efecto de este error inicial, por lo que los resultados del modelo para los últimos 20 años del periodo considerado, y en concreto para el año 2050 objeto de nuestro análisis, ya no se ven afectados por este error de calibrado inicial. Debemos recalcar que este factor de atenuación recoge tanto

Figura 211. Evolución de la demanda total de energía eléctrica del sector transporte para los contextos BAU y tecnología E3.0. Situación postcalibrado.

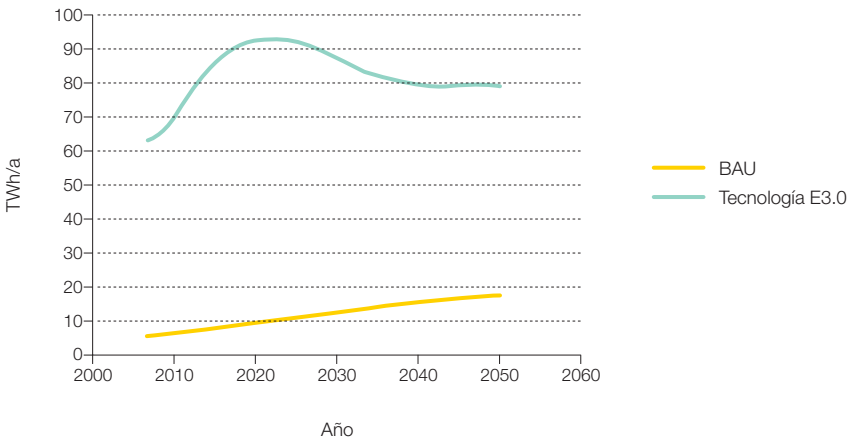
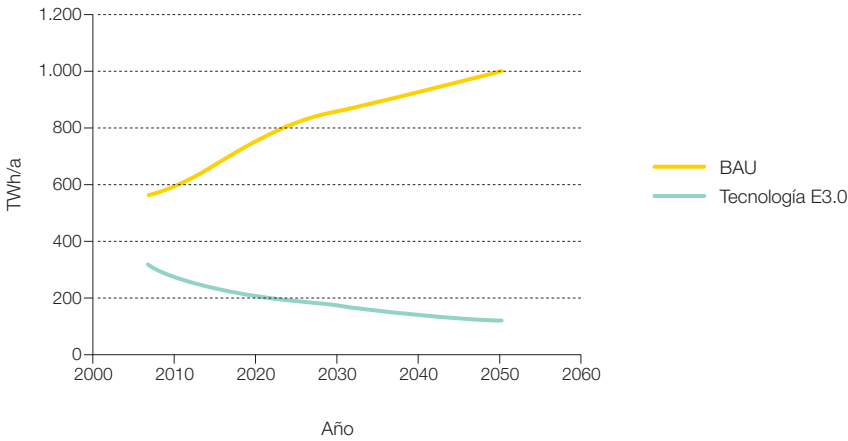


Figura 212. Evolución de la demanda total de energía en forma de combustibles del sector transporte para los contextos BAU y tecnología E3.0. Situación postcalibrado.



la internalización de las causas de error asociadas a la estimación de parámetros de entrada (demanda de movilidad y consumos específicos de las distintas tecnologías), como de la incorporación en las evaluaciones oficiales del consumo de energía final del sector transporte de todas sus contribuciones. La figura 209 recoge la evolución de este factor de atenuación.

Finalmente, en las figuras 210 a 212 recogemos la estructura energética final del sector transporte una vez incorporadas las correcciones de calibrado. Es de resaltar que estos resultados ya vuelven a incorporar el 50% de la movilidad exterior.

3.6.6 Escenario transición de BAU a E3.0

Hasta aquí hemos desarrollado escenarios para dos contextos distintos: un contexto BAU bastante progresista, y el contexto de eficiencia que hemos denominado E3.0.

El contexto E3.0 es aquel hacia el que entendemos que debemos evolucionar para cimentar nuestra sociedad sobre unas bases de sostenibilidad. El año 2050 parece un plazo más que razonable para haber desarrollado el contexto E3.0 en nuestro país. Por otro lado, el contexto BAU es aquel del que partimos en la actualidad.

Por tanto, resulta evidente que para evolucionar del contexto BAU al contexto E3.0 será preciso seguir una senda de reconversión de nuestros sistemas energético, económico, político y social. Estos escenarios de introducción del contexto E3.0 pueden ser muy variados y dependen de múltiples factores. En este estudio nos limitamos principalmente a analizar los puntos inicial (BAU)

y final (E3.0), que son comunes a todos los escenarios de introducción del contexto E3.0 Sin embargo, dado que los contextos BAU y E3.0 se han desarrollado en forma de escenarios continuos a lo largo del periodo analizado, resulta ilustrativo echar un ojo a las evoluciones que cabe esperar de la demanda energética bajo distintas opciones de escenarios de introducción del contexto E3.0.

El primer punto a tener presente es que la mayoría de los elementos sobre los que se basa el contexto E3.0 son mecanismos de respuesta rápida³⁶⁴. En efecto, a lo largo de este estudio hemos insistido mucho en la necesidad de basar los procesos de cambio en mecanismos de respuesta rápida, puesto que la situación hasta la que hemos dejado que evolucione el sistema climático, como consecuencia de las perturbaciones antropogénicas a las que le hemos sometido, ya no admite considerar los mecanismos de respuesta lenta como una opción para evitar que sobrepasemos los puntos de no retorno del sistema climático: nuestra desidia e incapacidad hasta la fecha para resolver, o incluso afrontar de forma responsable el problema del cambio climático, nos ha conducido a una situación en la que estamos viviendo de las rentas inerciales de dicho sistema.

Por tanto, al estar basado el contexto E3.0 principalmente en mecanismos de respuesta rápida, la capacidad de desarrollar el proceso de cambio no se encuentra con ninguna limitación fundamental que requiera unos plazos mínimos, dependiendo básicamente de la evolución de nuestro sistema político, y por ende de las exigencias que la sociedad ponga en el sistema político para que abra las puertas que permitan la rápida entrada del contexto E3.0. Es decir, el escenario de transición hacia E3.0 que sigamos, depende exclusivamente de nosotros.

³⁶⁴ Incluso por lo que respecta a aspectos tales como la maduración de la sociedad, un mecanismo que en su conjunto es evidentemente de respuesta lenta, las exigencias para desarrollar el contexto E3.0 son mínimas, en el sentido que se deja que sean las propias fuerzas de mercado las que dirijan la evolución hacia la eficiencia, para lo cual solo es preciso que se modifiquen las condiciones de contorno y señales entronco a las cuales se estructura el sistema económico. La implicación de la sociedad por tanto se limita a su exigencia al sistema político para que mande las señales adecuadas que permitan establecer ese sistema económico basado en prestaciones energéticas, de tal forma que incluso en un contexto de demanda creciente de servicios, se consiga evolucionar por la senda E3.0.

De cara a cuantificar los impactos de distintas opciones, vamos a poner como ejemplo tres escenarios de introducción del contexto E3.0:

- Un escenario que denominaremos retardado, en el cual seguimos retrasando la adopción de medidas efectivas de cambio en nuestro país durante otros 30 años.
- Un escenario que denominaremos lineal, en el cual realizamos una introducción progresiva a tasas del contexto E3.0 constantes a lo largo de todo el periodo de tiempo considerado.
- Un escenario que denominamos responsable, en el cual aceleramos durante los primeros años la introducción del contexto E3.0. A este escenario le denominamos responsable por ser el escenario más³⁶⁵ consecuente con los requerimientos del sistema climático de los tres analizados.

Anteriormente ya presentamos los ritmos de introducción del contexto E3.0 asociados a los tres escenarios considerados. Un punto que resulta interesante recordar es que el escenario “responsable” presenta unas tasas de introducción del contexto E3.0 al principio del escenario, del mismo orden que las que debe afrontar el escenario “retardado” hacia finales del escenario. Sin embargo, estas tasas máximas de introducción del contexto E3.0 no se traducen por igual en los requerimientos de reducción de la demanda para los escenarios “retardado” y “responsable”.

Debido a la incertidumbre que envuelve a los indicadores empleados para el proceso de calibrado del modelo, presentamos aquí los resultados correspondientes tanto al modelo sin calibrar, como al modelo calibrado, con la idea de que la realidad puede quedar entre medias.

En la figura 213 encontramos los escenarios resultantes de demanda total de energía del sector transporte (viajeros y mercancías) tal y como salen del modelo energético sin aplicar la corrección de calibrado. Como podemos apreciar, la tasa de reducción de la demanda que se requiere desplegar en los primeros años del escenario “responsable” es considerablemente inferior a la que tiene que afrontar el escenario “retardado” en los últimos años del periodo analizado: cuanto más se retrase el afrontar el problema de forma decidida, más difícil nos va a resultar el resolverlo. Pero es más, en el caso del escenario retardado, esos grandes esfuerzos de reconversión que traspasamos como herencia a la generación de nuestros hijos, tienen muchas posibilidades de resultar inútiles, dado que el pico en la demanda energética del sector transporte en nuestro país se encuentra en torno al año 2030, mucho más allá de la fecha límite según el cuarto informe del IPCC para alcanzar el pico mundial³⁶⁶ de emisiones (2015), por lo que difícilmente van a contribuir a que el sistema climático sobrepase los puntos de no retorno. Es decir, la herencia que dejamos para las generaciones siguientes a la de nuestros hijos es incluso más lamentable.

El escenario “lineal” muestra una opción intermedia, en la que las mayores tasas de reducción de la demanda de energía se retrasan hacia el final del escenario. Las tasas máximas de este escenario son ligeramente inferiores a las del escenario “responsable”, pero deben sostenerse durante periodos de tiempo más elevados.

La figura 214 recoge los resultados correspondientes al caso del modelo calibrado, donde podemos apreciar cómo se suavizan las tasas de reducción requeridas al principio del periodo de análisis, como consecuencia fundamentalmente de la progresiva

365 Realmente, el escenario más consecuente con el nivel global y con los requerimientos del sistema climático, ya queda fuera de nuestro alcance, pues hubiera requerido que en los denominados países desarrollados hubiéramos desplegado el contexto E3.0 ya hace algunos años, de tal forma que este contexto pudiera extenderse a las economías emergentes y al resto de países menos desarrollados, al ritmo suficiente para permitir que alcanzáramos un pico de las emisiones globales de GEI en el año 2015.

366 A raíz de las evidencias que nos ha mostrado el sistema climático en los últimos años, hay motivos para pensar que incluso los objetivos marcados en el cuarto informe del IPCC resultan insuficientes para evitar traspasar los puntos de no retorno del sistema climático.

internalización del déficit de demanda de movilidad.

Por último, la figura 215 nos recoge el efecto acumulado de cada uno de los escenarios

sobre la demanda de energía del sector transporte, sin aplicar la corrección por calibrado. Tomando como referencia la demanda acumulada del escenario “retardado”, el escenario “responsable” conduce a una

Figura 213. Escenarios de demanda de energía del sector transporte (viajeros y mercancías) asociados a los distintos escenarios de introducción del contexto E3.0. Resultados sin corrección por calibrado.

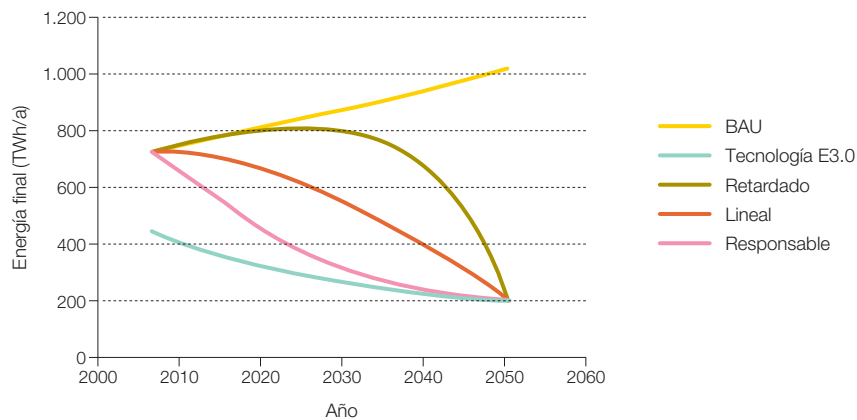


Figura 214. Escenarios de demanda de energía del sector transporte (viajeros y mercancías) asociados a los distintos escenarios de introducción del contexto E3.0. Resultados con corrección por calibrado.

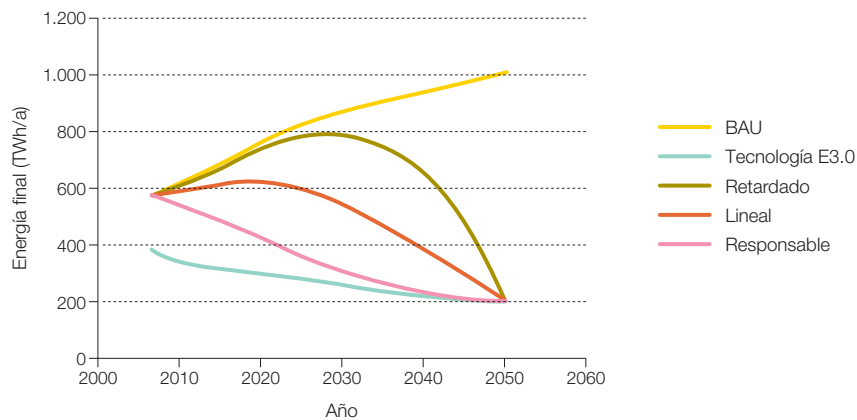


Figura 215. Demanda total de energía acumulada a lo largo del escenario para el sector transporte (viajeros y mercancías) con los distintos escenarios de introducción del contexto E3.0: caso no calibrado.

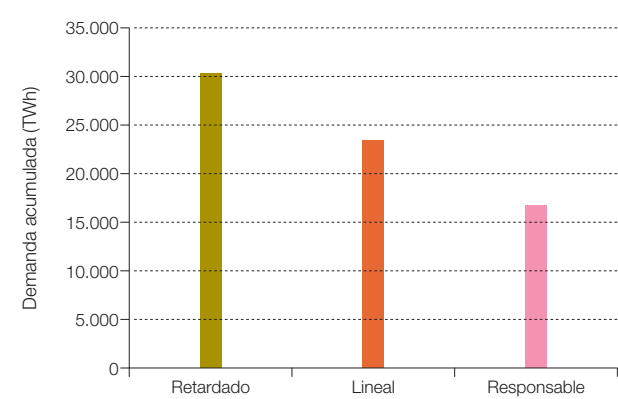
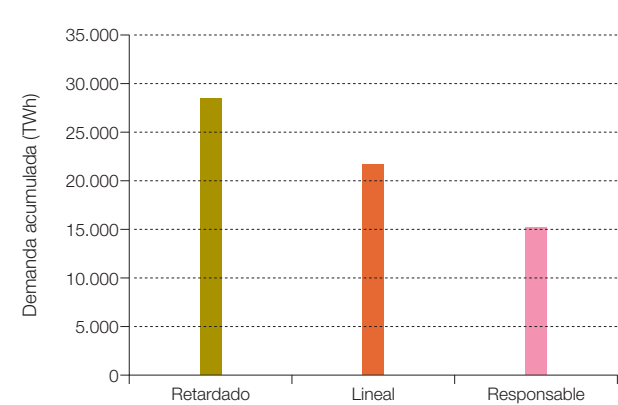


Figura 216. Demanda total de energía acumulada a lo largo del escenario para el sector transporte (viajeros y mercancías) con los distintos escenarios de introducción del contexto E3.0: Caso calibrado.



demanda acumulada del 54,7%, mientras que el escenario “lineal” conduce a una demanda acumulada de 76,8%. En términos de demanda anual media para el sector transporte, en el escenario “retardado” es de 694 TWh/a, en el “lineal” de 532 TWh/a y en

el “responsable” de 379 TWh/a, lo cual cabe comparar con las demandas anuales medias de los contextos BAU y E3.0, que resultan ser de 869 TWh/a y 285 TWh/a respectivamente. Por tanto, podemos concluir que el potencial de ahorro energético asociado a un

despliegue responsable del contexto E3.0 es muy elevado. En el caso de considerar los resultados del proceso de calibrado (figura 216), las demandas anuales medias para el sector transporte serían, en el escenario “re-tardado” de 654 TWh/a, en el “lineal” de 496 TWh/a y en el “responsable” de 349 TWh/a.

3.7 Sector edificación

El sector edificación ya tiene un peso importante en la estructura de la demanda energética de España, y se espera que esta importancia se acentúe en el horizonte de los escenarios considerados, tanto para el caso BAU como para el caso E3.0, por diversos motivos:

- La existencia de un gran parque de edificios construidos (por encima de la demanda real), con escasas consideraciones de eficiencia energética hasta prácticamente la actualidad, y con una larga vida útil por delante.
- Una estructura todavía no saturada de la demanda energética (por ejemplo para refrigeración), que introduce tendencias a incremento de la velocidad crecimiento demanda.
- Mecanismos de respuesta lenta (regulación energética y certificación) de implementación muy reciente y limitada.
- La ausencia de desarrollo de mecanismos de respuesta rápida para acelerar la transición del sector hacia la eficiencia energética.
- Mecanismos económicos establecidos de muy baja eficiencia energética.
- Gran potencial de participación en mecanismos de gestión de la demanda, para convertirse en cómplice de la transición del sistema energético.

La situación actual es, por un lado, bastante desoladora:

- Gran retraso en la implementación de los mecanismos de respuesta lenta, que ha llegado recientemente, después del boom de la construcción en el que se edificó una superficie sensiblemente superior incluso a la demandada³⁶⁷.
- Regulación energética con exigencias limitadas.
- Certificación energética de edificios nuevos con una implementación lenta y limitada en relación a su efectividad.
 - Escalas de certificación relativas que permiten, en los edificios no residenciales, que un edificio de mayor consumo adquiera una mejor certificación que otro de menor consumo (García-Casals X., CONAMA 2008).
 - Herramientas de certificación con importantes limitaciones³⁶⁸.

Por otro lado, el potencial de mejora en el sector edificación es muy importante, por lo que constituye una pieza clave en el despliegue de un sistema energético sostenible.

Al igual que sucede con el sector transporte, en el contexto de electrificación del sistema energético, resulta prioritaria la implementación de medidas de eficiencia en el sector edificación con la doble finalidad de:

- Limitar la demanda energética, y acotar de esta forma los recursos a movilizar (tanto económicos como de espacio) para configurar un mix energético basado en energías renovables con capacidad para cubrir esta demanda. Adicionalmente, tal y como ilustrábamos en la introducción de este informe,

³⁶⁷ Fecha de finalización del periodo transitorio para el Código Técnico de la Edificación (CTE: RD 314/2006): 29/9/2006.

- Inicio de la certificación obligatoria de edificios nuevos (RD 47/2007): 31/10/2007.
- Entrada en vigor de la actualización del Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE), encargado de imponer los requerimientos de eficiencia sobre los sistemas energéticos de los edificios en el marco del CTE y de la certificación: 29/2/2008.
- Certificación energética de edificios existentes: todavía inexistente en las fechas de redacción de este informe (10/2010).

³⁶⁸ Hasta tal punto que es posible “pasear” (es decir, hacerle cambiar su calificación) un edificio dado por la escala de calificación sin introducir ninguna mejora real en el mismo a base de modificar la capacidad de cubrir la demanda de confort (García Casals X., CONAMA 2008).

la contracción de la demanda es la única que nos garantiza la sostenibilidad, incluso de un sistema energético basado en renovables a largo plazo.

- Acotar los requerimientos de ampliación del sistema de transporte eléctrico, así como su impacto ambiental y el de las infraestructuras de generación necesarias (aun cuando estén basadas en energías renovables), y eliminar la que podría resultar una barrera insalvable en los plazos de tiempo disponibles para desplegar el contexto E3.0.

También resulta conveniente resaltar el hecho de que la implementación de medidas de eficiencia en el sector edificación conduce a una modificación sustancial de la estructura de su demanda energética, por lo que su integración en el conjunto del sistema energético presenta importantes aspectos diferenciales respecto a la situación actual, o a un escenario BAU.

En este capítulo presentamos los resultados del desarrollo de escenarios energéticos del sector edificación en los contextos BAU y E3.0. Para ello empezaremos discutiendo una serie de conceptos previos que nos permitan centrar las características de este sector energético, explorar el potencial de eficiencia del mismo, recogido en estudios anteriores, y poner encima de la mesa algunos de los ingredientes para evolucionar hacia el contexto E3.0. Posteriormente procederemos a desarrollar un escenario de evolución del parque edificatorio en términos de superficie construida y su correspondiente reparto modal entre las distintas tipologías de edificios. A continuación, discutiremos los distintos elementos que configuran la demanda energética de un edificio presentando las medidas de eficiencia susceptibles de ser incorporadas. La demanda energética del parque de

edificios en el contexto BAU se obtendrá mediante la simulación dinámica³⁶⁹ a nivel provincial de cada una de las tipologías de edificios, bajo condiciones BAU de los componentes de demanda energética. Para obtener la demanda energética del parque de edificios en un contexto eficiente se repetirán estas simulaciones considerando las condiciones E3.0 de los componentes de la demanda energética. Finalmente, según estos resultados, y para distintos escenarios de transición del contexto BAU al E3.0, desarrollaremos escenarios de evolución de la demanda energética de este sector en el horizonte de tiempo considerado.

3.7.1 Consideraciones previas

En este punto recogemos información previa del estado y posible evolución del sector edificación para contextualizar el desarrollo de los escenarios BAU y E3.0 que posteriormente presentamos, así como aquellos elementos y referencias imprescindibles para elaborar los escenarios.

3.7.1.1 Contribución sectorial a la demanda energética

El primer elemento a tener presente, al analizar la repercusión del sector edificación en el consumo de energía, es la absoluta ausencia de monitorización del consumo energético en nuestro parque de edificios. Por tanto, cualquier evaluación que nos encontremos tiene implícito un considerable grado de incertidumbre debido a que la asignación al sector edificación se ha tenido que hacer por vía indirecta.

Si consideramos los balances energéticos de la AIE como representativos de la información

³⁶⁹ La herramienta usada para las simulaciones de los edificios ha sido Energy Plus del departamento de energía de EE. UU.

oficial sobre la estructura de la demanda energética en España, en el último balance disponible al escribir este informe (balance AIE del año 2007), encontraríamos que el peso asignado al sector edificación asciende al 24,5% del consumo energético, por detrás de los sectores transporte (37,7%) e industrial (25,4%)³⁷⁰. Sin embargo, en los balances de la AIE el tratamiento que se hace de la electricidad no es en términos de energía primaria³⁷¹, por lo que no es directamente comparable a los otros consumos energéticos, falseando las comparaciones porcentuales. Si empleamos el rendimiento medio del sistema de generación eléctrica, derivado de los propios datos del balance de la AIE, y corregimos con esto los términos de energía eléctrica en los distintos sectores, llegamos a una foto más indicativa de la estructura actual de la demanda energética primaria sectorial en España. En estas condiciones, el sector edificación representa un 32,9% del consumo energético total, por delante de los sectores industrial (28,7%) y transporte (28,4%). Para el balance del año 2006 estos porcentajes eran de 32,2% para la

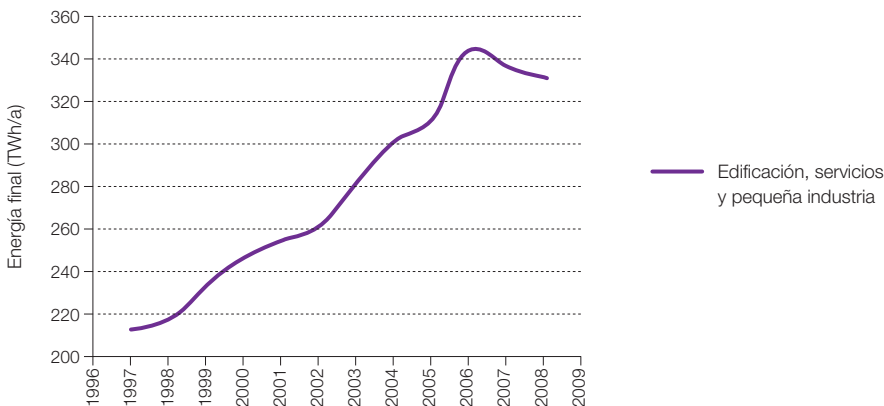
industria, del 29,9% para la edificación, y del 29,7% para el transporte.

En la figura 217 recogemos la evolución del consumo de energía final en el sector de la edificación, servicios y pequeña industria entre 1997 y 2008 según los datos registrados en Eurostat³⁷².

Pero hay cuatro elementos que hacen que el peso del sector edificación sea, o pueda ser en el futuro, incluso superior al arriba indicado, y esto sin considerar sus interrelaciones con las emisiones asociadas al transporte por la demanda de movilidad de los ocupantes de los edificios:

- La energía almacenada en los materiales y proceso de construcción de los edificios no se ve reflejada en el balance de la AIE dentro del sector edificación, sino dentro de los sectores industria y transporte.
- Las incertidumbres asociadas a la falta de monitorización del consumo energético en el sector edificación.

Figura 217. Evolución del consumo de energía final en los sectores de edificación, servicios y pequeña industria. Datos Eurostat.



370 El resto corresponde a un 2,9% de la agricultura, un 1,7% de usos energéticos no especificados, un 4,4% de materias primas de productos petroquímicos, y un 3,3% de otros usos no energéticos.

371 Excepto, curiosamente, para la energía nuclear, en cuyo caso sí que se considera en energía primaria.

372 Es importante saber que esta serie presenta un pico en el año 2006 (343 TWh/a) por encima de 2007 (336 TWh/a). Esta situación, así como los valores concretos, no se corresponden con los balances de la AIE para estos años, que para el conjunto de los sectores residencial, comercial y de servicios públicos proporciona en términos de energía final unos valores de 265 TWh/a para el año 2006 y de 292 TWh/a para el año 2007. Estas divergencias ilustran algunas de las limitaciones de la caracterización del consumo energético del sector edificación.

- La falta de internalización de la demanda de confort potencial en el parque de edificios en España.
- El hecho de que actualmente no todo el parque de edificios construido se halla en uso.

A nivel de la UE, la cifra oficial³⁷³ que se maneja para cuantificar el peso del sector edificación en el consumo de energía es del 40%.

Este elevado peso porcentual del sector edificación, junto a su potencial crecimiento y el carácter distribuido de los edificios, hacen que, en un contexto de elevada electrificación del sistema energético, resulte prioritario el apurar al máximo las posibilidades de las medidas de eficiencia energética en este sector para acortar tanto los recursos destinados a la generación de energía, como las infraestructuras y sus impactos de las instalaciones requeridas para generar, transportar y distribuir esta energía. Afortunadamente, el potencial de eficiencia de este sector es muy elevado, de tal forma que al unirlo con la capacidad de generación distribuida con elementos integrados en los propios edificios puede llegar a plantearse incluso³⁷⁴ los edificios de consumo energético neto nulo (ZEB³⁷⁵).

3.7.1.2 Regulación, planificación y otros mecanismos de respuesta lenta

La regulación energética de los edificios ha experimentado en España un largo, y en ciertos sentidos tortuoso (García-Casals, X., 2004) proceso de renovación a lo largo de los últimos 15 años. En (García-Casals, X., 2007) se puede encontrar una recapitulación hasta poco antes de que apareciera el RD que establecía la certificación energética de edificios nuevos en España, y en (García-Casals, X., 2008, 2008-2, 2008-3 y 2008-4) algunas de

las problemática que persistían después del primer año de rodadura del proceso de certificación energética de edificios, gran parte de las cuales siguen estando vigentes.

Actualmente la regulación energética de los edificios nuevos se articula a través del Código Técnico de la Edificación (CTE), del cual recogemos a continuación algunos puntos relevantes:

- Establecido en RD 314/2006, con finalización del período transitorio para entrada en vigor el 29/9/06 por lo que respecta a la envolvente del edificio y el 29/2/08 por lo que respecta a los sistemas energéticos de los edificios (RITE: RD 1027/07).
- Introduce exigencias de eficiencia sobre la demanda energética del edificio y sobre algunos de los sistemas energéticos del edificio. Sin embargo, estas exigencias son, en muchos casos, limitadas en relación al potencial de ahorro disponible³⁷⁶.
- La exigencia de eficiencia no es absoluta, es decir, no limita la demanda energética del edificio (sus kWh/m²), sino relativa a una referencia variable³⁷⁷. Por tanto no es una exigencia orientada a objetivos de acotar en un valor conocido³⁷⁸ la demanda del parque de edificios.
- Introduce requerimientos de cobertura de parte de la demanda de ACS de los edificios con energías renovables en la mayoría de los edificios.
- Introduce requerimientos de la instalación de una pequeña potencia fotovoltaica en los grandes edificios del sector terciario (pero no en los edificios residenciales).

³⁷³ Ver por ejemplo las Directivas 91/76/CEE sobre eficiencia energética, la 2002/91/CE sobre eficiencia energética en la edificación y la 2010/31/EU sobre eficiencia energética en la edificación.

³⁷⁴ Otro tema es si en el contexto de un sistema energético integrado tiene sentido el empeñarse en alcanzar el objetivo de ZEB, perdiendo el potencial de interacción sinérgica entre el sector edificación y el sistema energético.

³⁷⁵ ZEB: Zero Energy Building.

³⁷⁶ En el caso de la envolvente esto es especialmente cierto para los edificios de baja compactidad, donde el CTE es menos exigente que la antigua NBE CT 79 (García-Casals X., 2004). En el caso de los sistemas, el RITE se deja importantes huecos como la limitación de rendimiento de enfriadoras o de potencia de bombeo, y es demasiado permisivo en otros casos como la potencia de los ventiladores.

³⁷⁷ En efecto, la limitación prescriptiva está establecida en términos de los coeficientes globales de transferencia de los distintos componentes de la envolvente, y la prestación en función de la comparación con un edificio de geometría variable proyecto a proyecto.

³⁷⁸ De hecho, uno de los mayores problemas que tenemos en la actualidad en relación al parque edificatorio es la falta de monitorización y conocimiento de la estructura de la demanda energética del mismo. En otros países, como EE. UU., la administración lleva a cabo una monitorización de la estructura de consumo energético de su parque de edificios, de tal forma que es posible definir mecanismos de calificación de los edificios orientados a objetivos. Un ejemplo sería el programa Energy Star de la EPA para edificios existentes, que compara el consumo energético de un edificio con el de la estructura del parque de edificios existentes, de tal forma que se empiezan a ganar estrellas a partir de edificios cuyas prestaciones energéticas se encuentren por encima de las del 75% del parque de edificios existentes.

Como mecanismo para impulsar la eficiencia del sector más allá de los límites regulatorios (CTE), se ha introducido la certificación energética de los edificios, que el RD 47/2007, con finalización del periodo voluntario el 31/10/07, estableció como obligatoria para los edificios de nueva construcción³⁷⁹. Todavía no existe en España un procedimiento de certificación de edificios existentes³⁸⁰, aunque se esperaba que estuviera disponible a lo largo del año 2010³⁸¹.

El procedimiento de certificación oficial de edificios nuevos probablemente todavía no ha llegado en España a ganarse la confianza del sector, lo cual contribuye a incrementar todavía más el tiempo de respuesta para que este mecanismo, que ya de por sí es de respuesta lenta, deje sentir sus efectos. Las causas de

esta situación son múltiples (García-Casals, X., 2008-3), y es probablemente la credibilidad de la metodología y las herramientas impuestas una de las determinantes, y las dificultades de comunicación y transparencia en el proceso, otra. Elementos como el que un edificio de mejor calificación pueda tener mayor consumo energético que otro de peor calificación³⁸², que sea fácilmente modificable la calificación de un edificio al cambiar los parámetros de entrada en las herramientas de cálculo sin salirse del ámbito de un proyecto determinado y sin introducir mejoras en el desempeño energético del edificio³⁸³, la imposibilidad de incluir en las herramientas de cálculo algunas soluciones de elevada eficiencia, el que se penalicen intrínsecamente algunas fuentes energéticas dentro de las herramientas de cálculo decantando la solución adoptada hacia la menos eficiente³⁸⁴,

³⁷⁹ La implementación de este procedimiento de certificación de los edificios nuevos ha resultado extremadamente lenta. A pesar de su entrada en vigor el 30/4/2007, al finalizar el 12/2/2009, más de dos años y medio después de su entrada en vigor, solo había 5 CCAA que habían incorporado legislativamente el procedimiento, y muy pocos edificios que estuvieran certificados. A fecha de redacción de este informe (10/2010), en la web del Ministerio de Industria solo figuran referencias a legislación relativa a la certificación energética de edificios en 6 CCAA.

³⁸⁰ En el momento de redactar este informe (10/2010).

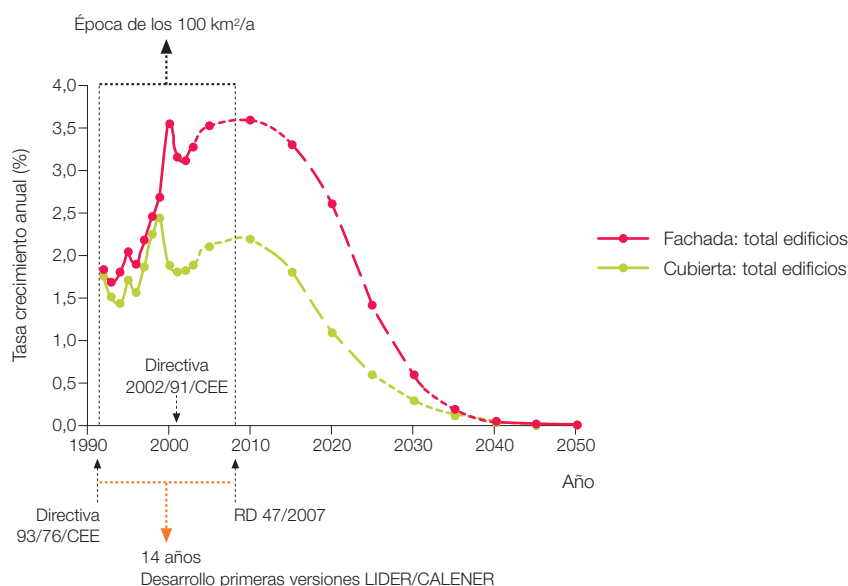
³⁸¹ Sin embargo, los borradores que han circulado hasta ahora sobre la certificación energética de edificios existentes, incluyen un cronograma de implementación que desplaza hasta después de unos ocho años de la entrada en vigor del correspondiente RD el inicio de la certificación de edificios con potencias térmicas instaladas por debajo de 400 kW. Es decir, que si entrara en vigor en 2011, hasta 2019 no se empezaría a activar este mecanismo de mercado ya de por sí de respuesta lenta: plazos excesivos a la luz de las exigencias de cambio de modelo energético que nos imponen las condiciones de contorno de nuestro sistema climático (en 2015 se debería alcanzar el máximo mundial en emisiones de CO₂, por lo que en España debería alcanzarse antes).

³⁸² Esta situación puede darse en los edificios no residenciales (sector terciario), pues a diferencia de los residenciales, su escala de certificación no es absoluta (según los consumos específicos: kWh/m²-a), sino relativa (por comparación del consumo y emisiones del edificio con una referencia que cambia edificio a edificio).

³⁸³ En concreto, esta situación se produce como consecuencia de que las herramientas empleadas para la calificación, no comprueban el cumplimiento o no de las demandas de confort, por lo que basta con dejar de cubrir las demandas de confort para que mejore la calificación energética del edificio (García-Casals, X., 2008-2).

³⁸⁴ Así, por ejemplo, para la electricidad del sistema eléctrico peninsular se considera en la certificación energética de edificios un coeficiente de emisiones de 649 g CO₂/kWh, mientras que el valor total en España para

Figura 218. Tiempos asociados al desarrollo del proceso de certificación de edificios en España contextualizados en el marco del escenario de evolución del sector edificación, que desarrollamos en el informe *Renovables 2050*, en términos de superficie de cubierta y superficie de fachada del total de edificios.



y errores³⁸⁵ que todavía persisten en las herramientas de calificación con un importante efecto sobre la calificación finalmente obtenida, sin duda no han resultado nada beneficiosos para la internalización de la certificación dentro del proceso de definición de los edificios, para impulsar el mercado hacia mayores cotas de eficiencia. Probablemente algunos o todos estos inconvenientes se irán solventando con el tiempo, pero su efecto sobre la dilatación³⁸⁶ del tiempo de respuesta de este mecanismo de incentiación del mercado ya es irremediable.

En la figura 218 contextualizamos los tempos de desarrollo del proceso de certificación energética de edificios en España con el escenario de evolución del sector edificación que planteamos en el informe *Renovables 2050*.

Por otro lado, a lo largo de estos últimos años se ha experimentado un crecimiento relativamente rápido de procedimientos de certificación ambiental de los edificios de carácter voluntario pero reconocido prestigio internacional (LEED³⁸⁷, BREEAM³⁸⁸, etc.). Estas certificaciones tienen un carácter mucho más integral que la certificación energética oficial, aunque su alcance es todavía limitado en relación al total del parque de edificios, y su interacción con el proceso de diseño del edificio permite avanzar en la incorporación de componentes de sostenibilidad. Estas certificaciones han entrado en España en el campo de los edificios nuevos y cabe esperar que con el tiempo se vayan extendiendo a los edificios existentes. Constituyen una herramienta apropiada para incentivar la evolución del sector edificación, pero como mecanismos de respuesta lenta que son, no tienen por sí mismos capacidad de introducir una evolución en escalón.

Por lo que respecta a la planificación asociada a la integración de energías renovables

en los edificios, el PER³⁸⁹ 2005-2010 estableció la planificación³⁹⁰ del desarrollo de las energías renovables hasta 2010. Recogemos a continuación la situación de las distintas tecnologías renovables susceptibles de ser integradas en la edificación:

• Solar Térmica de baja temperatura:

- Objetivo PER para 2010 de 4,9 Mm² (3,43 GW_p a razón de 0,7 kW/m²), con una generación térmica³⁹¹ de 4,4 TWh/a.
- Superficie instalada a finales 2008 (Polo P., 2009): 1,71 Mm² (1,20 GW_p a razón de 0,7 kW/m²).
- La mayoría de la potencia instalada vinculada al sector edificación.
- Evolución prevista: dificultad para alcanzar el objetivo PER 2010 a pesar del carácter obligatorio impuesto por el CTE, y considerable incertidumbre sobre la aportación real de esta potencia instalada, al no haber mecanismo alguno para garantizar su generación de energía. La presencia de un mecanismo vinculado a la generación de energía, más que a la instalación de potencia, del estilo de las tarifas reguladas dentro del Régimen Especial del sistema eléctrico, proporcionaría una mayor garantía de resultado y activación del mercado.

• Solar Fotovoltaica:

- Objetivo PER para 2010 de 0,4 GW_p.
- Potencia instalada hasta 2008 (dentro marco RD 661/07 que introdujo el mecanismo capaz de activar el mercado) de unos³⁹² 3,5 GW_p, la mayoría no en edificios. En 2008 se llegó a instalar³⁹³ una potencia superior a 2,5 GW_p/a.
- En 2008 aparece el RD 1578/08 que corta bruscamente³⁹⁴ el ritmo de desarrollo de la fotovoltaica, introduciendo los cupos de

2008 era de 390 g CO₂/kWh, y en el año 2009 de 270 g CO₂/kWh (CNE), siendo dentro de la península todavía inferiores estos coeficientes.

385 A fecha de redacción de este informe (10/2010), más de tres años y medio después de la entrada en vigor de la certificación energética de edificios nuevos, todavía hay errores como el correspondiente al tratamiento de la permeabilidad de las ventanas que permiten llevar cualquier edificio del sector terciario hasta una calificación-A (la más alta posible) a base de empeorar exageradamente las prestaciones del edificio de referencia.

386 Debe tenerse presente que el proceso de introducción de la certificación energética de edificios en España viene desde 1993.

387 LEED: Leadership in Energy and Environmental Design.

388 BREEAM: BRE Environmental Assessment Method.

389 PER: Plan de Energías Renovables.

390 Actualmente hay publicado un PANER (Plan de Acción Nacional de Energías Renovables) para el periodo 2010-2020, que deberá concretarse en un PER 2010-2020 que todavía no está publicado al redactar este informe (10/2010).

391 De acuerdo con la productividad empleada en el PER de 892 kWh/m²-a. es de notar que esta productividad elevada supone usar las instalaciones con elevado CF, y por tanto con SF limitadas. De cualquier forma, al no controlarse la generación de las instalaciones solares, basándose la monitorización del cumplimiento del plan tan solo en la potencia (superficie) instalada, la generación que realmente aporte esta superficie de colectores solares está indefinida.

392 Según la CNE, había 3,35 GW_p facturando.

393 Tasa que como comentaremos más adelante es del orden de las requeridas para conseguir una descarbonización del sistema eléctrico en los plazos dispuestos para compatibilizar nuestro sistema energético con las restricciones del sistema climático.

394 Es de resaltar que esta situación se ha replicado a finales de 2009 para el resto de tecnologías renovables, introduciendo los mismos instrumentos (cupos y registro de preasignación de retribuciones) con la misma consecuencia final de gran calado: frenar el desarrollo de las tecnologías renovables en nuestro país de forma brusca y

potencia que limitan a un máximo de 0,4 GW_p/a la potencia total a instalar, de los cuales 0,0267 GW_p/a corresponden a las instalaciones en edificación con potencia inferior a 20 kW_p. Otra novedad de este RD fue la creación de un registro de pre-asignación de retribuciones, en disonancia con los planteamientos de la Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de las energías renovables, incrementa de forma significativa³⁹⁵ la burocracia y trabas administrativas para desarrollar instalaciones fotovoltaicas, especialmente de forma desproporcionada para el caso de las instalaciones integradas en los edificios por su menor tamaño.

• Biomasa para sector edificación³⁹⁶:

- Objetivo PER para 2010 de 28,6 TWh/a.
- Estimación potencia instalada en 2010 de calderas de biomasa³⁹⁷: 0,27 GW.
- Estimación generación calderas biomasa en 2010³⁹⁸: 1 TWh/a.

• Eólica integrada en edificación:

- No hay objetivos en el PER-2010.
- No hay mecanismos de activación implementados (la mini eólica no dispone de prima específica dentro de régimen especial).

• Bombas de calor aerotérmicas:

- No hay objetivos en el PER-2010.
- No hay mecanismos de activación implementados.

• Bombas de calor geotérmicas:

- No hay objetivos en el PER-2010.
- No hay mecanismos de activación implementados.

Para las otras tecnologías renovables, cuyo desarrollo industrial se ha conseguido activar con el mecanismo de tarifas (eólica³⁹⁹, solar termoeléctrica), nos encontramos con una situación muy parecida a la de la fotovoltaica: los valores de la potencia instalada han superado ampliamente los límites planificados en el PER, acercándose rápidamente a los valores de potencia instalada anualmente que necesitaríamos para hacer realidad la transición de nuestro sistema energético en el plazo disponible⁴⁰⁰. Esto debería haberse interpretado como un éxito del mecanismo de apoyo al desarrollo de las renovables en nuestro país en su primera fase, la de despegue. Pero ante esta situación, la respuesta política y regulatoria ha sido introducir escalones bruscos y una gran inseguridad legislativa, truncando de raíz la inercia que habían adquirido los sectores industrial y financiero, y poniendo en serio peligro la continuidad de estos desarrollos en nuestro país, y prácticamente anulando la posibilidad de que podamos desplegar las renovables al ritmo que requeriríamos⁴⁰¹.

Por tanto, podemos concluir que los mecanismos actualmente puestos en juego para el sector edificación son básicamente mecanismos de respuesta lenta (requieren grandes periodos de tiempo para producir cambios significativos), que por ahora⁴⁰² afectan tan solo al parque de edificios nuevos (no incentivan cambio en el gran parque de edificios existentes que hemos construido aceleradamente e ineficientemente a lo largo de los últimos años), y que presentan carencias importantes (y en algunos casos introducen barreras significativas) de cara a materializar la evolución requerida del sector edificación hacia su descarbonización y eficiencia energética.

La evolución del sector edificación hacia mayores niveles de eficiencia y descarbonización puede ser mucho más rápida y contundente

muy poco sensible a la realidad de los mercados que habían permitido situar a nuestro país en posición de abarcar la transformación de nuestro sistema energético en los plazos disponibles. Así, por ejemplo, en el caso de la solar termoeléctrica, tecnología que podría jugar un papel fundamental en la descarbonización de nuestro sistema eléctrico, el PER marcaba un objetivo a 2010 de 0,5 GW, mientras que en 2009 había sobre la mesa propuestas de proyectos para desarrollar durante los próximos años con un total de 15,6 GW de potencia que ya habían pagado el aval de punto de conexión. El cupo correspondiente se fijó en el RD Ley 6/2009 con un máximo de 2,4 GW a instalar hasta el año 2013, con el consiguiente frenazo brusco que esto implica para la industria y las entidades financieras que estaban dispuestas a desarrollar esta tecnología.

395 A lo largo del primer año de entrada en vigor del RD 1578/08, el Ministerio de Industria llegó a emitir hasta cuatro o cinco requerimientos adicionales sucesivos de información para dar por completada la admisión en el registro, convirtiendo el proceso en un calvario.

396 El objetivo del PER es sobre el uso total de biomasa térmica, abarcando tanto sector edificación como el industrial, y asciende para 2010 a 47,3 TWh/a. Considerando que la fracción de esta biomasa térmica que corresponde al sector edificación es en 2010 igual al del año 2004 (60,4%), obtenemos una estimación del objetivo de biomasa térmica para el sector edificación en el valor indicado. Por otro lado, es preciso resaltar que esta contribución de la biomasa es principalmente la debida a los usos tradicionales que ya estaban implementados con anterioridad al PER. En efecto, en 1999, la aplicación de la biomasa térmica ascendía ya a 39,9 TWh/a, por lo que el incremento planificado para 2010 es de 7,4 TWh/a en relación a lo que teníamos en 1999 y de 6,8 TWh/a respecto a lo que teníamos en 2004.

397 Este valor constituye tan solo una aproximación de acuerdo con los resultados publicados por el Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa (ONCB) correspondientes a septiembre de 2010 (Ramos J. J., 2010). A fecha de septiembre de 2010 el ONCB tenía registrada una potencia total de 450 MW, de los cuales del orden del 60% asumimos que corresponden al

de lo que se está planteando en España. En este sentido resulta ilustrativo fijarse en los programas de edificios de muy bajo consumo que se están impulsando en otros países, así como sus plazos para alcanzar esos objetivos a unos pocos años vista⁴⁰³.

3.7.1.3 Sobre los etiquetados energéticos

Mención especial dentro de los mecanismos de respuesta lenta merecen los etiquetados energéticos.

Dentro del sector edificación es donde primero y de forma más extensa hemos visto evolucionar los etiquetados energéticos. En primer lugar aplicado a distintos equipamientos de consumo doméstico (luminarias, neveras, lavadoras, equipos de aire acondicionado, etc.), y más recientemente sobre los propios edificios⁴⁰⁴, y sobre la electricidad que consumimos.

El etiquetado energético, en concepto, supone un mecanismo de cambio⁴⁰⁵ que pretende empujar el mercado más allá de los requerimientos regulatorios al añadir un valor añadido adicional al producto. Adicionalmente, el etiquetado energético cumple otra importante función, que es la de información al consumidor, lo cual pone en juego el ejercicio de la responsabilidad directa de los ciudadanos sobre la situación del sistema energético.

Por tanto, es fundamental que los sistemas de etiquetado energético sean consecuentes con los objetivos de eficiencia y adaptados a las necesidades reales de evolución del sistema energético⁴⁰⁶.

Lamentablemente la situación actual del etiquetado energético no responde en la mayoría de los casos a estos planteamientos.

Sobre la certificación energética de los edificios, ya hemos comentado más arriba algunos de los aspectos que la separan de la situación deseable. Por lo que respecta al resto de certificaciones energéticas de equipamiento para los edificios, a menudo las limitaciones en su alcance y los bajos niveles de exigencia reducen significativamente su impacto como mecanismos de cambio.

En las certificaciones energéticas de otros equipamientos eléctricos nos encontramos a menudo con exclusiones del proceso de certificación, limitada claridad de los datos asociados a la certificación y/o valores bajos de los requerimientos de eficiencia para situarse en las clases de mayor eficiencia.

Así, por ejemplo, en la certificación de lámparas, cuya certificación viene regulada por el RD 284/1999, nos encontramos para empezar que el ámbito de aplicación se limita a las lámparas de uso residencial, con unos límites de la escala variables en función del flujo luminoso de la lámpara⁴⁰⁷, y que entre estas quedan excluidas las de baja potencia (inferior a 4 W), las de elevado flujo luminoso (superior a 6500 lm), y todas aquellas que incorporen reflector. Por tanto, lámparas como las halógenas dicoicas tan empleadas en los edificios, se encuentran en el mercado sin etiquetado energético alguno, a pesar de que sus eficacias luminosas⁴⁰⁸ son tan solo ligeramente superiores a las de una bombilla incandescente, y muy inferiores a las de una lámpara fluorescente compacta. En la figura 219 vemos plasmados los límites de las clases A y B en función del flujo luminoso. Para valores tipo de los flujos luminosos en una aplicación residencial los límites de las clases B y A son del orden de 20 lm/W y 55 lm/W respectivamente, valores que conviene contrastar con la disponibilidad actual en el mercado (110 lm/W para tubos fluorescentes), y

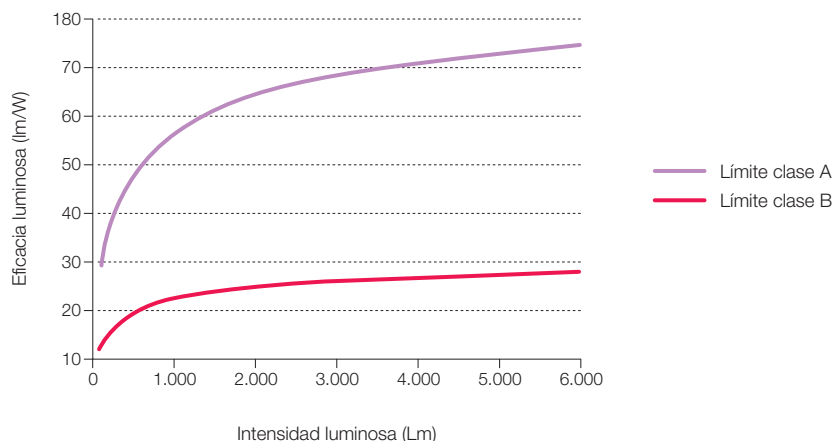
sector edificación (el resto está en aplicaciones industriales), proporcionado una potencia de 270 MW.

398 Estimación de acuerdo con el resultado de potencia registrada por el ONCB (Ramos J. J., 2010). Considerando 270 MW en el sector edificación, operando con un CF medio del 40%, obtenemos una generación de calor útil de 0,95 TWh/a.

399 El factor diferencial de la eólica respecto a las otras renovables que se han activado en el marco regulatorio español (solar fotovoltaica y solar termoeléctrica), es que el despegue comercial de esta tecnología no se ha producido en España, sino que se produjo con anterioridad gracias al apoyo regulatorio en otros países (Dinamarca, EE. UU., Alemania), y aquí en España hemos entrado en la fase de acompañamiento al asentamiento comercial de forma compartida con otros países. En el caso de las tecnologías solares, las hemos pillado en la fase de despegue y es nuestro país el principal foco de implementación, por lo que su vulnerabilidad a la inseguridad regulatoria es tremendamente superior.

400 En estas condiciones, cabe preguntarse ¿a qué obedecen los objetivos de planificación de renovables en España? Evidentemente no es ni el recurso renovable disponible, ni a la urgencia de cambio del sistema energético, ni a la capacidad de desarrollo comercial de las tecnologías. Puesto que es difícil pensar en una razón más importante que las anteriormente expuestas, la pregunta es por lo menos bastante inquietante. De hecho, resulta absurdo que una planificación hecha sin ninguna orientación a objetivos actúe como barrera al desarrollo de las renovables en nuestro país. Un importante signo de maduración de nuestros sistemas político y administrativo sería analizar el origen de esta importante disfunción planificadora y poner los medios para que no se replice en el futuro, pero lamentablemente no parece que esta sea la tendencia establecida.

401 Pero a diferencia de hace 10 años, en los que prácticamente todo el mundo creía que era imposible conseguir alcanzar estos ritmos de despliegue de las renovables por incapacidad de los sectores industrial y financiero, ahora la evidencia se impone y el hecho de no poder desarrollar las renovables al ritmo que requiríamos pasa a ser

Figura 219. Límites de eficacia luminosa para las clases A y B según RD 284/1999.

los valores que se espera alcance la tecnología LED alrededor del año 2020 (230 lm/W).

Respecto a los equipos domésticos de acondicionamiento de aire, su etiquetado energético viene regulado por el RD 142/2003, que excluye a los equipos aire-agua, agua-agua, y a aquellos con potencia superior a 12 kW. El límite de la clase-A para los equipos acondicionadores de aire refrigerados por aire es de $EER^{409} > 3,2$ para aparatos con dos o más unidades interiores, de $EER > 3,0$ para aparatos compactos, y de $EER > 2,6$ para aparatos de conducto único. A modo de contraste, en Japón, bajo la regulación local que impulsa los límites de eficiencia de los aparatos de aire acondicionado hacia los valores de los mejores equipos disponibles en el mercado⁴¹⁰, ya están manejando $EER > 6,5$.

3.7.1.4 Electrificación del sector edificación

Tradicionalmente hemos manejado la idea de que resultaba más eficiente, energéticamente hablando, cubrir la demanda de energía

térmica de los edificios mediante energía térmica⁴¹¹ que mediante energía eléctrica. El concepto subyacente en esta idea es el bajo rendimiento con el que tradicionalmente convertíamos la energía de los combustibles fósiles en electricidad en las centrales térmicas (30-40%). Este concepto también es el que subyace en el planteamiento tradicional de la mayor eficiencia de la cogeneración, pues el aprovechamiento del calor residual producido en la generación de electricidad mediante combustibles fósiles (o cualquier otro combustible químico o nuclear) conduce a un ahorro de energía primaria⁴¹² (y por tanto de emisiones) respecto a la opción de generar independientemente electricidad y energía térmica a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, debemos estar dispuestos a revisar estos conceptos a la luz de la evolución de nuestro sistema energético, pues las soluciones más apropiadas para el pasado no tienen por qué ser las más adecuadas en el presente y futuro cercanos.

La elevada descarbonización que cabe esperar que experimente nuestro sistema de generación eléctrica⁴¹³, representa un cambio

responsabilidad exclusiva de nuestro sistema político-administrativo. De hecho, en el contexto actual de limitación de capacidad inversora, nuestro sistema político-administrativo está funcionando como un espanta-inversores, negándonos la posibilidad de acceder a este recurso escaso en los próximos años en los que se impondrá la evidencia de la urgencia de cambio.

402 Hasta fecha de redacción de este informe (10/2010).

403 Sin intención de ser exhaustivos, podemos citar: la regulación en el Reino Unido, con el objetivo de que todos los edificios residenciales sean neutros en carbono el año 2016; "Plus Energie" en Francia para 2020; ZEB (Zero Energy Buildings) en EE. UU.; NATHERS 10-star en Australia; NZE Housing en Canadá; "Zero Utility Cost Houses" en Japón; "Null Energiehaus" en Alemania; "Passivhaus" adoptado como estándar obligatorio en Suecia y varias ciudades de Alemania; "Architecture 2030 Challenge" en EE. UU., con un 60% de reducción de consumo en 2010, un 80% reducción para 2020, y alcanzando la neutralidad para 2030; La regulación Danesa estableciendo como objetivo para los edificios nuevos a partir de 2015 un consumo menor que el del Passive Haus, reduciéndolo a la mitad para 2020; etc. La propia nueva Directiva de prestaciones energéticas de los edificios (2010/31/EU) establece el objetivo de que a partir de diciembre de 2020 todos los edificios nuevos sean de consumo casi cero.

Uno de los planteamientos recientes más ambiciosos y que muestran cómo de rápido puede desarrollarse el potencial del sector edificación, así como la urgencia en acometer de forma decidida actuaciones en este sector, es el de la nueva regulación sobre el sector edificación en el Reino Unido, diseñada de forma orientada a objetivos para hacer viable el objetivo global de reducir en un 80% las emisiones de GEI en este país para el año 2050. En esencia esta regulación apunta a la neutralidad en carbono de los edificios para 2016-2019, para lo cual, sin embargo, ya se han dado cuenta de que es preciso habilitar mecanismos de respuesta más rápida que permitan materializar cambios en escalón (CCC, 2009). Si tomamos como referencia la regulación energética de los edificios en el año 2006, la nueva regulación se propone reducir un 25% en 2010 y un

radical que nos fuerza a modificar el concepto tradicional de que la generación térmica con calderas o incluso la cogeneración representan las soluciones más eficientes.

En efecto, el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico Español en 2008 fue de 390 g CO₂/kWh_e (ref CNE, 2009), siendo inferior para el sistema eléctrico peninsular (en torno a 325 g CO₂/kWh_e)⁴¹⁴. Ya incluso en estas condiciones, teniendo en cuenta que una caldera de gas natural⁴¹⁵ de elevado rendimiento (95%) produce unas emisiones de 215 g CO₂/kWh_t, la electrificación de la demanda térmica del edificio mediante bombas de calor con unas prestaciones disponibles en el mercado Español (COP = 3.5) nos conduciría a unas emisiones de 93 g CO₂/kWh_t en el sistema eléctrico peninsular⁴¹⁶, y para el caso del estándar Japonés para las bombas de calor domésticas en 2010 (COP ≈ 6,5) se podría reducir a 50 g CO₂/kWh_t. En el año 2009 el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico Español fue de 270 g CO₂/kWh_e (ref CNE, 2010), por lo que la comparativa resulta todavía mucho más favorable para la solución electrificada. Por tanto, las emisiones asociadas a la cobertura de la demanda térmica mediante electricidad, incluso con el sistema eléctrico actual y siempre que se empleen bombas de calor eficiente, son inferiores a las que nos proporciona una caldera de elevado rendimiento⁴¹⁷.

Esta situación cabe esperar que se acentúe mucho más en los próximos años, en los que asistiremos a una rápida descarbonización del sistema de generación eléctrica mediante energías renovables. En un sistema eléctrico con bajo coeficiente de emisiones (por introducción de renovables), y empleando bombas de calor de buenas prestaciones, incluso la cogeneración pierde su sentido al dejar de proporcionar ahorros de energía primaria⁴¹⁸.

De hecho, las bombas de calor hay que entenderlas como tecnologías que aprovechan energía térmica de origen renovable⁴¹⁹ (solar para ser más precisos) almacenada en el aire (bombas aerotérmicas), o en la tierra (bombas de calor geotérmicas). En efecto, en una bomba de calor con COP = 4, trabajando en modo calor, $\frac{3}{4}$ partes de la energía térmica aportada provienen de energía renovable (solar), y el $\frac{1}{4}$ restante proviene de la electricidad consumida por la bomba de calor, con una contribución renovable que irá creciendo rápidamente a lo largo de los próximos años. Al ir aumentando el COP de las bombas de calor, aumenta la aportación renovable local, y al ir reduciéndose el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, aumenta la aportación renovable “centralizada”⁴²⁰. Eventualmente, al alcanzar un sistema de generación eléctrica 100% renovable, el aporte de energía térmica a los edificios equipados con bombas de calor (para calefacción, refrigeración y ACS) sería 100% renovable.

Por tanto vemos cómo al sector de la edificación se le abre no solo una, sino todo un abanico de opciones de alcanzar en los próximos años una integración del 100% de renovables para cubrir su demanda energética. La primera batería de herramientas a implementar, son las de eficiencia energética y bioclimatismo, es decir, medidas encaminadas a reducir la demanda de energía final del edificio. Y para el remanente de la demanda energética del edificio, aquella que haya que aportar de forma activa, se abren dos⁴²¹ vías de satisfacer esta demanda energética: sistemas autónomos de energías renovables de origen térmico, y electrificación con bombas de calor que se apoyan en un sistema eléctrico interconectado⁴²² cuya generación esté basada en energías renovables.

44% en 2013 el consumo energético de los nuevos edificios residenciales, para alcanzar en 2016 su neutralidad en carbono. Para 2019 el requerimiento de neutralidad en carbono quedará extendido al resto de edificios no residenciales, y para 2030 se habrá completado la rehabilitación energética de todo el parque de edificios residenciales.

404 Actualmente los edificios nuevos, pero a lo largo del año 2010 se esperaba que estuviera disponible también el etiquetado energético de los edificios existentes (a fecha de escritura de este informe en el 10/2010 todavía no está disponible).

405 Sin embargo, al actuar de forma tan indirecta sobre el mercado, constituye un mecanismo de cambio lento.

406 De lo contrario, introducen ruido de fondo sin aportar ninguna contribución al cambio y confundiendo al consumidor con el consecuente debilitamiento del efecto de su corresponsabilización con la situación actual del sistema energético.

407 Con menor exigencia cuanto más bajo sea el flujo luminoso.

408 Una lámpara de este estilo caería por la clase-C del etiquetado energético.

409 EER: índice de eficiencia energética.

410 Top Runner Regulations.

411 Calderas de combustible.

412 Cuando este ahorro de energía primaria es superior a un 10% se califica a la cogeneración como de alta eficiencia.

413 Según la creciente penetración de energías renovables que tendremos que impulsar en los próximos años si queremos tener opciones de estabilizar el sistema climático de nuestro planeta.

414 Resulta interesante observar que el coeficiente de emisiones de la electricidad peninsular implementado en las herramientas de certificación energética oficiales en España es de 649 g CO₂/kWh_e (ref IDAE, 2009), totalmente alejado de los valores actuales, lo que puede contribuir a desfigurar la calificación energética de edificios, y a desplazar las soluciones adoptadas hacia mayores emisiones.

415 Con cualquier otro combustible fósil las emisiones serían superiores.

416 Estas son unas estimaciones preliminares, pues dado que el COP de una bomba de calor depende tanto de la evolución de las condiciones ambiente como de su estado de carga, el ahorro efectivo en emisiones depende del emplazamiento climático, del dimensionado del

Cuál de estas dos vías se imponga depende de varios factores, entre los cuales, en primera instancia podemos citar los dos siguientes:

- Sinergias entre los distintos servicios energéticos a cubrir. En este sentido hay que tener en cuenta que a medio plazo, una vez aplicadas las medidas de eficiencia energética, los servicios energéticos de climatización del edificio (calefacción y refrigeración) van a ceder su actual protagonismo sobre la demanda energética total del edificio, a otros servicios que forzosamente tienen que satisfacerse vía eléctrica (iluminación, equipamiento, bombas, ventiladores, etc.). En estas condiciones, el emplear el mismo vector energético (la electricidad) para cubrir las demandas energéticas de climatización, ofrece ventajas logísticas respecto a la opción de introducir nuevos vectores energéticos.
- Costes económicos de las distintas opciones. En el marco de mercado libre, las opciones de menor coste se imponen a las de costes superiores. En este aspecto, la opción eléctrica basada en bombas de calor eficientes y un sistema eléctrico interconectado abastecido por energías renovables tiene todos los puntos para resultar económicamente más favorable⁴²³ que los sistemas autónomos basados en energías renovables térmicas.

En (Rong F., Clarke L., Smith S., 2007) se presentan escenarios de evolución de la demanda energética del sector edificación hasta 2095 en EE. UU. Incluso bajo el contexto BAU la previsión apunta a una creciente electrificación del sector espoleada por tres factores: un mayor incremento del coste de los combustibles fósiles respecto a la electricidad (que ve atenuado su incremento de coste por la posibilidad de recurrir a otras fuentes de

energía primaria no fósil), la aparición de tecnologías eléctricas más eficientes para hacerse cargo de la demanda de servicios (especialmente bombas de calor para calefacción, que es la demanda dominante en EE. UU.), y finalmente por el gran incremento de demanda de servicios asociados con electrodomésticos, equipamiento de oficina y tecnología de la información. Pero en un escenario con limitación a las emisiones de CO₂ analizado por esta referencia, esta tendencia a la electrificación se acentúa de forma notable debido a la mayor diferencia de precios entre los combustibles fósiles (gravados con impuestos por emisiones de GEI) y la electricidad, que consigue estabilizar sus costes en relación a los combustibles fósiles mediante la mayor integración de renovables en el sistema.

Más allá de los factores hasta aquí comentados, en un futuro muy próximo y asociados al desarrollo de las redes inteligentes, pueden aparecer elementos adicionales tales como los mecanismos de mercado asociados a la gestión de la demanda, que hagan que la opción de electrificación completa del sector residencial resulte todavía más interesante y favorable frente a las opciones de energías renovables térmicas autónomas.

3.7.1.5 Sobre el uso de biomasa en aplicaciones energéticas

Ante este planteamiento de electrificación del sector electrificación conviene profundizar un poco más sobre una de las alternativas autónomas de generación de energía térmica que en los últimos años se está introduciendo en nuestro país y que ya hace algunas décadas que se extiende por países del centro y norte de Europa: la combustión de biomasa⁴²⁴. Y al mismo tiempo resulta conveniente contextualizar esta discusión en el contexto más amplio

sistema y de las condiciones de uso del edificio.

417 El "secreto" de esta afirmación aparentemente contradictoria es que una bomba de calor eficiente mayoritariamente emplea energía térmica ambiente para cubrir la demanda de energía térmica del edificio, y su consumo eléctrico representa una pequeña fracción del calor ambiente aprovechado.

418 Más adelante elaboraremos esta afirmación con más detalle.

419 Y así lo refleja la nueva Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. En esta Directiva solo se considera la aportación renovable de las bombas de calor para máquinas con un COP mínimo, pendiente de definirse completamente para el año 2013, pero que para España estará en torno a $COP_{min} = 2,6$ todavía. Adicionalmente, esta Directiva considera como aporte renovable el total de aporte térmico procedente del ambiente, y no añade consideraciones adicionales relativas al consumo eléctrico en el que incurre la bomba de calor para bombear este aporte térmico ambiente más allá que la anteriormente mencionada exigencia de una eficacia mínima.

420 El término "centralizado" debe interpretarse aquí como "procedente de la red eléctrica", pero no implica ningún posicionamiento sobre la participación de la generación distribuida en dicha red eléctrica.

421 Y todas las combinaciones posibles entre ambas.

422 El término "interconectado" lo usaremos para describir el conjunto del sistema eléctrico, y se corresponde a lo que en terminología actual denominaríamos "centralizado". Sin embargo, al evolucionar hacia grandes aportaciones de la generación distribuida a base de energías renovables, el carácter "centralizado" se irá diluyendo, quedando como atributo principal de este sistema eléctrico la interconexión que facilita los flujos de información y energía y la integración del sistema energético. Así mismo, emplearemos el término "autónomo" para describir esas aplicaciones que en terminología actual podríamos haber denominado "descentralizadas", pero que al descentralizarse la generación en el sistema eléctrico interconectado, el atributo diferencial que retienen es el de "autónomo" por la carencia de transferencia de flujos de energía e información con el sistema eléctrico interconectado.

de la fijación de carbono en forma sólida dentro de la biosfera. De esta discusión podemos extraer conclusiones interesantes en relación por ejemplo a la priorización en el uso de los distintos tipos de biomasa, y a su claro distanciamiento de otros planteamientos de fijación de carbono mediante biomasa.

En los últimos años las aplicaciones térmicas de la biomasa han crecido significativamente en nuestro país debido, por un lado, a la entrada de equipos avanzados de combustión de biomasa procedentes de centro y norte de Europa, y por otro lado a la proliferación de los indicadores en términos de emisiones de CO₂ para evaluar la eficiencia energética de los edificios (junto a la consideración de emisiones netas nulas que se ha asignado a la biomasa dentro de estos indicadores). En este contexto, las soluciones basadas en la combustión de la biomasa conducen a una mayor facilidad de dar cumplimiento a la normativa en términos de eficiencia energética, y de alcanzar mayores calificaciones energéticas de los edificios que las incorporen.

En efecto, en España, si tomamos como ejemplo el cumplimiento del CTE⁴²⁵ en lo referente al requerimiento de incorporación de energía solar térmica en todos los edificios nuevos para producción de ACS (HE4), este requerimiento resulta mucho más sencillo, y a menudo más económico, de satisfacer sustituyendo la instalación solar térmica por una caldera de biomasa, con lo que además se incrementa la cobertura con fuentes renovables en la producción de ACS desde el valor siempre inferior⁴²⁶ al 100%, que puede proporcionar una instalación solar térmica hasta el 100% que aporta una caldera de biomasa, e incluso más allá, porque en muchos casos la instalación de biomasa puede emplearse también para cubrir el total de la demanda de calefacción, que en muchos emplazamientos

climáticos y para muchas tipologías de edificios es en la actualidad significativamente más elevada que la de ACS.

Pero aún es más, la certificación energética de edificios en España concede con facilidad una calificación-A (la mejor) a cualquier edificio que implemente como tecnología de calefacción una caldera de biomasa, debido a que considera la biomasa como neutra en términos de emisiones de CO₂, y a que el indicador que se emplea para la calificación energética son las emisiones de CO₂ y no el consumo energético. En estas condiciones es fácil de entender que el uso de la biomasa puede inhibir la aplicación de medidas de eficiencia energética en los edificios, pues el beneficio a obtener por aplicación de estas medidas de cara a la calificación energética es prácticamente nulo, y su coste siempre aumenta una vez tomada la decisión de implementar una caldera de biomasa, al mismo tiempo que conduce a un importante incremento de la biomasa que quemamos.

Sin embargo, tal y como se apunta en (Nick Grant, Alan Clarke, 2010)⁴²⁷, esta situación que también se está produciendo en el Reino Unido⁴²⁸, y que puede verse fuertemente amplificada en toda la UE al incrementar los requerimientos de reducción de emisiones e introducir mecanismos de apoyo FIT⁴²⁹ para el calor de origen renovable, puede conducirnos en la dirección contraria a la deseada si no se introduce un poco más de rigor en la consideración de la biomasa en relación a las emisiones de CO₂.

En efecto, al quemar la biomasa, su coeficiente de emisiones in situ es de unos⁴³⁰ 460 g CO₂/kWh, frente a los 215 g CO₂/kWh del gas natural con una buena caldera, es decir, más que el doble. Evidentemente esto no quiere decir ni muchísimo menos que sea

⁴²³ En (García-Casals X., 2006) puede encontrarse un estudio específico para el caso de los sistemas de refrigeración solar.

⁴²⁴ Aplicación que todavía se puede extender mucho más si a los mecanismos de apoyo existentes se le añade la incorporación de una FIT (feed in tariff) como se plantea en las propuestas de la UE para incentivar las aplicaciones de generación de calor de acuerdo con renovables.

⁴²⁵ CTE: Código Técnico de la Edificación.

⁴²⁶ El requerimiento de la HE4 del CTE oscila entre el 30% y el 70% según la zona climática en la que se ubique el edificio y el tipo de energía de apoyo que se emplee.

⁴²⁷ Sin embargo discrepamos de las conclusiones de esta referencia en cuanto a la comparación de la biomasa con los combustibles fósiles, pues la argumentación presentada en esta referencia falla en la consideración de los escalones temporales de desplazamiento de carbono de la biomasa a la atmósfera, aspecto radicalmente distinto a la incorporación adicional de carbono al ciclo de la biosfera tal y como argumentaremos a continuación.

⁴²⁸ Donde ya se están apreciando señales (como el incremento del precio de la madera) de que el crecimiento del uso de la biomasa está empezando a desplazar otras actividades basadas en el procesamiento de la madera.

⁴²⁹ FIT: Feed In Tariff. Tarifas de apoyo a la introducción de energías renovables como las que actualmente existen para el sistema eléctrico.

⁴³⁰ Considerando un 78% para el rendimiento estacional de la caldera de biomasa.

mejor quemar gas natural que quemar biomasa, pues por un lado la quema de gas natural inyecta una cantidad adicional de carbono al ciclo del carbono de la biosfera, mientras que la biomasa usa un carbono que ya estaba incorporado en este ciclo, y por otro lado la quema de gas natural agota un recurso no renovable, mientras que la biomasa, sí está ligada a la reposición del recurso mediante producción de una cantidad de biomasa equivalente a la quemada, y constituye un recurso renovable. Pero esta afirmación sí que quiere llamar la atención sobre el hecho de que las emisiones in situ asociadas al uso térmico de la biomasa no son nulas, sino más bien bastante elevadas⁴³¹, motivo por el que es preciso proceder a evaluar con más detalle las implicaciones de estas emisiones, para discriminar si es preciso diferenciar entre distintos tipos de biomasa, o introducir condicionantes al uso de la misma, desde la perspectiva del objetivo final de estabilizar la concentración atmosférica de CO₂.

El argumento en el que se apoya la consideración de neutralidad en términos de CO₂ del uso de biomasa es el mismo que está asociado a su carácter renovable: si la quema de la biomasa está ligada a la producción de una cantidad de biomasa equivalente a la quemada, la cantidad de carbono que fijamos en esa producción de biomasa es aproximadamente equivalente a la que introducimos en la atmósfera durante su combustión, por lo que su efecto puede considerarse globalmente neutro. Pero desde el punto de vista de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, debemos prestar atención a que este argumento de neutralización⁴³² de las emisiones in situ de la biomasa mediante la fijación de CO₂ asociada a la producción de esa biomasa solo se aplica en el caso de que el uso de la misma para combustión no esté sustituyendo a otro uso posible de la biomasa

con una mayor eficacia de fijación de CO₂, como puede ser la fijación de ese CO₂ por periodos de tiempo mucho más largos en la forma de productos no combustibles (vigas de madera para edificación, muebles, aislamiento térmico y acústico para los edificios, etc.).

Para entender mejor la justificación de este argumento, así como para poder diferenciar las implicaciones del uso de los distintos tipos de biomasa, conviene detenerse un poco a discutir con más detalle estos conceptos e introducir alguna cuantificación.

El carbono presente en la biosfera evoluciona a lo largo de un ciclo en el que va pasando sucesivamente de forma gaseosa en la atmósfera a forma sólida en la biomasa. Para una situación de equilibrio dinámico dada de este proceso cíclico, el carbono que se encuentra en forma gaseosa (y que por tanto produce efecto invernadero) es un porcentaje fijo del total de carbono en la biosfera.

Por otro lado, cada proceso de fijación de carbono gaseoso por la biomasa se caracteriza por un *tiempo de retención* de ese carbono en forma sólida. Este tiempo de retención puede ir desde unas décadas para los procesos de descomposición natural⁴³³, hasta del orden de 200-300 años⁴³⁴ para la biomasa que incorporamos en procesos productivos como por ejemplo componentes de madera o derivados en los edificios.

Mientras no modifiquemos los usos que hacemos de la biomasa, el porcentaje de carbono de la biosfera que se encuentra en forma gaseosa permanecerá aproximadamente fijo⁴³⁵, pero al introducir una modificación sobre los usos de la biomasa ese porcentaje se alterará, y con él el efecto invernadero que cause ese carbono.

431 Más adelante cuantificaremos cómo de elevadas.

432 Que en cualquier caso no siempre habrá una neutralización completa al considerar tanto los efectos de emisiones positivas por el procesamiento, cultivo y transporte de esa biomasa, como por el contrario, los efectos de fijación por la parte no recolectada de las plantas que generaron esa biomasa. Los coeficientes de emisión oficiales en el Reino Unido oscilan entre 15 g CO₂/kWh para las astillas y 37 g CO₂/kWh para los pellets ("The Standard Assessment Procedure, revised emission factors for the National Calculation Methodologies", Marzo 2009, BRE).

433 En el caso de la descomposición natural de la madera, el tiempo de retención puede ser del orden de 100 años, y al cabo de este tiempo todavía queda un 10-15% de la biomasa original que está tan incorporada en los procesos geobiológicos del suelo que podría considerarse permanentemente fijada (Waste Management Options and Climate Change: Final Report to European Commission, DG Environment Alison Smith, Keith Brown, Steve Oglvie, Kathryn Rushton and Judith Bates AEA Technology July 2001).

434 De forma conservadora, formado por el tiempo de vida útil del edificio, más el tiempo de degradación natural (retardado por los tratamientos que se le han dado a esa madera) que experimenta posteriormente ese componente del edificio (despreciando posibles reutilizaciones de esa madera).

435 Siempre que no haya otros procesos naturales que modifiquen los tiempos de retención de distintos tipos de biomasa, como los incendios. Estos otros efectos también son importantes en el balance global, pero no forman parte de este análisis, al no ser parte del sistema energético.

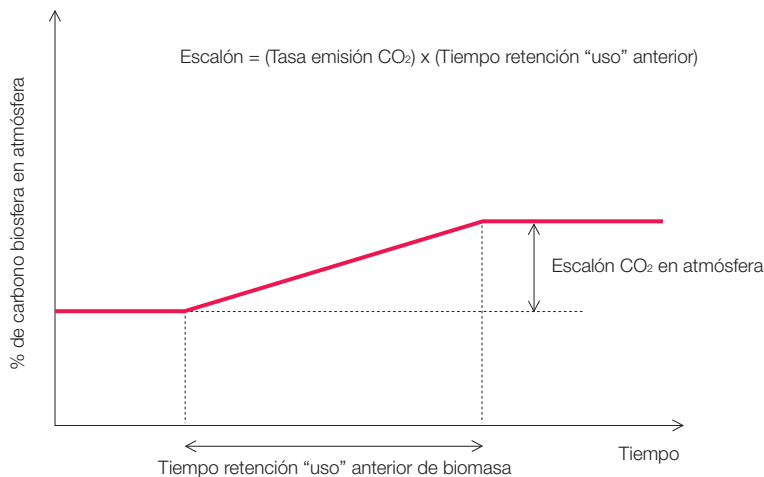
La combustión de la biomasa con fines energéticos, cuando la biomasa que quemamos tenía anteriormente asignado otro “uso” distinto (incluyendo entre los posibles “usos” anteriores los procesos de degradación natural), introduce una alteración en ese equilibrio y desplaza una parte del carbono de la biosfera hacia la parte gaseosa. La cantidad de carbono que se desplaza a la fase gaseosa es la que quemamos durante el tiempo de retención en fase sólida que tenía el “uso” anterior que se hacía de esa biomasa. Una vez transcurrido este tiempo se alcanza una nueva situación de equilibrio dinámico en el ciclo del carbono mientras se mantenga ese nuevo uso de combustión. Es decir, la nueva aplicación de combustión de la biomasa ha introducido un escalón en la cantidad de carbono atmosférico que se ha ido incrementando, de forma gradual, durante un periodo igual al tiempo de retención del “uso” anterior que

se daba a esa biomasa. La figura 220 ilustra gráficamente estos conceptos.

Pongamos por ejemplo el uso de biomasa residual con fines energéticos que, a priori, podría parecer el primer tipo de biomasa a aprovechar energéticamente. El “uso” como residuo de esa biomasa tenía asociado un tiempo de retención determinado, por lo que su aplicación energética mediante combustión introducirá un escalón en la cantidad de CO₂ atmosférico, igual a la tasa de emisión de CO₂ como motivo de esa combustión multiplicado por el tiempo de retención del “uso” anterior (proceso de degradación natural por ser una biomasa residual).

En el caso de que la biomasa empleada con fines energéticos desplace un uso anterior de la biomasa, como la elaboración de productos derivados de la madera para su aplicación en la edificación, dado que el tiempo de

Figura 220. Generación del escalón de desplazamiento de CO₂ de la biosfera de su forma sólida a la atmósfera al introducir un proceso de combustión de la biomasa que desplaza a un “uso” anterior de la biomasa que tenía un determinado tiempo de retención del carbono en forma sólida.



retención de este “uso” de la biomasa es más elevado que para la biomasa residual⁴³⁶, el escalón en la cantidad de CO₂ atmosférico será mayor de forma proporcional al ratio de los tiempos de retención.

Si en algún momento se invierte la situación y ese uso de la biomasa con fines energéticos se retorna a su uso original y se mantiene esa situación durante un tiempo igual al de retención del uso original, el escalón en la cantidad de CO₂ atmosférico se reproduce en dirección contraria. En este caso el tiempo para reestablecer el CO₂ a la atmósfera es lo suficientemente grande, del orden de algunos siglos⁴³⁷, para que tenga el potencial de proporcionar una contribución positiva a la estabilización del sistema climático.

En el caso de que la biomasa empleada con fines energéticos proceda de cultivos energéticos que no desplacen ningún uso anterior de la biomasa⁴³⁸, y de que se garantice en base anual la equivalencia entre la biomasa quemada y la generada en las plantaciones, esta situación no altera el equilibrio del ciclo del carbono, por lo que no conduce a un incremento en la cantidad de CO₂ en la atmósfera. Por tanto, este tipo de biomasa es la única que podría recibir un crédito completo de neutralidad en términos de carbono, mientras que en los casos anteriores, se le debería imputar a ese uso de la biomasa su contribución en la producción del escalón de cantidad de carbono atmosférico⁴³⁹. Esta contribución se podría evaluar como el producto de la liberación de carbono in situ, asociada a la combustión de esa biomasa (460 g CO₂/kWh)⁴⁴⁰, por un coeficiente que fuera el mínimo entre la unidad y el ratio entre el tiempo de retención del uso anterior de la biomasa y la vida útil de la caldera⁴⁴¹. Este planteamiento se podría aplicar también a los biocombustibles, bien fueran para aplicaciones

de transporte o para aplicaciones en edificación: tan solo aquellos procedentes de cultivos energéticos que no sustituyan a otros tipos de cultivo como los alimenticios⁴⁴², ni que desplacen otro ecosistema natural con producción de biomasa, podrían considerarse como bajos⁴⁴³ en términos de emisiones, mientras que a cualquier otra situación debería cargársele la parte del escalón de cantidad de CO₂ atmosférico que le corresponda.

A modo de cuantificación, para coger el pulso a la magnitud del problema, que nos puede suponer una consideración errónea de la neutralidad de la biomasa empleada con fines energéticos en el sector de la edificación, supongamos que nos planteamos la cobertura del conjunto de la demanda térmica para calefacción y ACS del sector edificación con una biomasa cuya combustión sustituye a otro uso de la biomasa con un tiempo de retención mayor o igual a los 20 años de vida útil de las calderas⁴⁴⁴. En este caso, la contribución de la combustión de esa biomasa a las emisiones de CO₂, efectivas en incrementar la cantidad de carbono en la atmósfera según la demanda del año 2007 (según balances AIE), serían de 57 MtCO₂/a⁴⁴⁵, que respecto a la opción de cubrir esa demanda térmica con otras fuentes de energía renovable, constituirían las emisiones netas adicionales, y que representarían un incremento del 62% frente a las emisiones imputables al uso de energía final total en el sector edificación durante el año 2007 (OSE, 2009), suponiendo que la biomasa sustituyera al gas natural⁴⁴⁶. Pero es más, en un contexto BAU en el que no se incentivara radicalmente la eficiencia energética⁴⁴⁷, la demanda térmica de los edificios seguiría creciendo, por lo que la magnitud del escalón de desplazamiento de CO₂ desde la biomasa a la atmósfera se intensificaría, llegando a unas tasas del orden de 78 MtCO₂/a para el año 2050⁴⁴⁸ a partir de cuyo

436 En efecto, pues al tiempo de degradación natural hay que sumarle el tiempo asociado al uso al que se aplica la biomasa (que en el caso de emplearla como elemento estructural de un edificio puede ser del orden de 100 años), e incrementar el tiempo de degradación natural como consecuencia de los tratamientos de estabilización a los que ha sido sometida, lo cual fácilmente puede conducir a un tiempo de retención total del orden de 300 años, superior al tiempo que hemos necesitado para desestabilizar el clima mediante la combustión de productos fósiles. Adicionalmente debemos tener en cuenta que esos componentes confeccionados a partir de la biomasa sustituyen a otros materiales en la edificación con un contenido energético y en carbono mucho más elevado (consideremos por ejemplo la sustitución de marcos de ventanas de aluminio con marcos de madera).

437 Para el caso de la biomasa empleada para productos de edificación, podríamos estar hablando de un periodo de unos 600 años para restablecer el escalón de desplazamiento de CO₂ a la atmósfera, suponiendo que la aplicación de combustión se mantuviera solo durante el periodo de tiempo necesario para generar el escalón completo. Por tanto, aunque el efecto pueda no ser “definitivo” como lo es la liberación de carbono contenido en combustibles fósiles, su periodo característico es muy grande respecto al tiempo disponible para estabilizar la concentración de CO₂ atmosférico. Es más, si al final queremos volver a revertir el escalón para evitar que sea definitivo, ¿por qué incentivar ahora el proceso que produce el escalón?

438 Esto excluye la posibilidad de producir cultivos energéticos en un área que anteriormente tenía una productividad natural de biomasa. Y además limita mucho el potencial de biomasa disponible: en términos de energía primaria, el recurso total de biomasa en la España peninsular podría ser de 426 TWh/a, de los cuales 273 TWh/a provienen de cultivos energéticos (GP, 2005).

439 Más allá de esta imputación en emisiones, de cara a los procesos de calificación energética de edificios, parecería más correcto emplear otro indicador en lugar de las emisiones, que tuviera en cuenta por un lado la demanda de energía del edificio, y por otro, la parte de esa demanda cubierta con energías renovables. En efecto,

momento todavía seguirían creciendo, y estas tasas de emisión se prolongarían durante un periodo del orden de 300 años (tiempo de retención del “uso” original de esa biomasa) para generar el escalón total de desplazamiento de CO₂ desde la biomasa a la atmósfera. Por tanto, podemos concluir que el efecto no es ni mucho menos despreciable, y que, por tanto, es preciso prestar una mayor atención a la cualificación de los distintos tipos de biomasa para sacar crédito de la neutralidad en términos de emisiones.

Si a estas consideraciones que de por sí ya recomiendan el limitar el uso de la biomasa con fines energéticos, le añadimos el potencial limitado del recurso biomasa que tenemos en nuestro país, y las potenciales aplicaciones del mismo en otros sectores como el transporte o la industria, fácilmente se puede entender que en el contexto E3.0 no hayamos contado a largo plazo con la aportación de la biomasa para la cobertura de la demanda de energía térmica en el sector edificación. Esto no quita que en el proceso de transición desde el contexto BAU al E3.0, la biomasa pueda jugar un importante papel en la introducción de recursos renovables en el sector edificación, pero creemos que esta contribución transitoria debería guiarse para evitar que condujera a una distorsión del efecto final perseguido. En concreto, el orden de prioridad en el uso de las biomásas con aplicaciones energéticas, desde la perspectiva de su impacto en las emisiones de CO₂, deberían ser los cultivos energéticos no sustitutivos de otro proceso de producción de biomasa⁴⁴⁹, las biomásas residuales, y por último las biomásas sustitutivas de otro uso⁴⁵⁰ ya establecido. Adicionalmente, a cada una de estas biomásas debería asignársele su correspondiente coeficiente de emisiones para evitar distorsionar los resultados de los mecanismos de incentiación de la reducción de GEI.

Hay otros dos temas indirectamente relacionados que merece la pena aclarar: la comparación del uso de biomasa con el de combustibles fósiles y la opción de utilizar la biomasa para introducir escalones negativos en la cantidad de CO₂ atmosférico.

El tratamiento del uso de los combustibles fósiles bajo esta perspectiva es radicalmente distinto al de la biomasa. En el caso de la biomasa veíamos que en el peor de los casos (biomasa no neutra) introducía un escalón en la cantidad de CO₂ atmosférico con posibilidad de ser revertido en el futuro, sin alterar la cantidad total de carbono en la biosfera. Para el caso de la combustión de productos fósiles, cada gramo de CO₂ liberado incrementa el CO₂ en la biosfera de forma irreversible, lo que altera la cantidad de CO₂ atmosférico. En este contexto, los planteamientos de fijación (sumideros) de CO₂ atmosférico mediante biomasa, para compensar las emisiones debidas a la combustión de productos fósiles, resultan totalmente inadmisibles. En efecto, si las masas de biomasa a las que se quiere atribuir ese efecto de sumidero ya existían en la biosfera, su efecto de compensación sobre el CO₂ adicional inyectado en el ciclo del carbono por la combustión de fósiles es nulo. Si por el contrario se plantan masas adicionales de biomasa que no desplazan ningún ecosistema anterior con productividad de biomasa, esta plantación adicional genera un escalón de signo negativo sobre la cantidad de CO₂ en la atmósfera, pero debido al carácter adicional del CO₂ liberado por la combustión fósil, la única opción para compensar ese efecto es que se garantizara por siempre (indefinidamente en el tiempo) la reposición de esa nueva masa de biomasa al terminar su tiempo de retención, pues de lo contrario, al terminar este periodo de tiempo, el escalón se revertiría a su situación original deshaciendo el efecto sumidero. Y puesto que es imposible

en principio no parece adecuado que dos edificios que operan con biomasa neutra y que tengan las mismas emisiones, obtengan la misma calificación cuando uno de ellos lo hace con un consumo muy inferior de biomasa por ser más eficiente (siendo como es la biomasa un recurso escaso y muy valioso dentro del sistema energético).

440 El valor de este coeficiente de emisiones depende del rendimiento de la caldera de biomasa empleada. Los 460 g CO₂/kWh se corresponden a un rendimiento medio estacional del 78%.

441 Así, por ejemplo, en el caso de emplear una caldera de biomasa con 20 años de vida útil y que emplea como combustible biomasa residual con un tiempo de retención del carbono de 10 años (este valor es muy bajo y sirve tan solo para ilustrar el ejemplo, pero hay biomásas residuales con tiempos de retención muy superiores), las emisiones in situ (a parte habría que añadirle las de transporte y procesado) a imputar a esa aplicación energética de la biomasa serían de $460/2 = 230$ g CO₂/kWh. Si por el contrario el combustible empleado por esta caldera desplaza un uso de biomasa para fabricar vigas de madera para la edificación, con un tiempo de retención de 300 años, las emisiones in situ a imputar a esa aplicación energética de la biomasa serían de 460 g CO₂/kWh. Y si el combustible procede de un cultivo energético de biomasa que no desplaza ninguna otra aplicación de la biomasa, las emisiones in situ a imputar a esa aplicación energética de la biomasa serían nulas, pero habría que añadirle las emisiones correspondientes a procesado y transporte de ese combustible.

442 De tiempo retención carbono más elevado.

443 En este caso estarían más lejos de la neutralidad por los mayores consumos asociados a la producción de los biocombustibles a partir de la biomasa.

444 Situación muy fácil si consideramos que en el caso de aplicaciones de madera en la construcción, el tiempo de retención puede ser del orden de 300 años.

445 Para ubicar este dato en su magnitud, basta mencionar que las emisiones totales imputables al uso final de energía en el sector edificación (no tan solo las asociadas a la cobertura de la demanda térmica) durante el año 2007 fueron de 51,8 MtCO₂/a (OSE, 2009).

446 Insistimos en que esta comparativa no implica que el gas natural (o cualquier fósil)

garantizar esa reposición indefinida de la nueva masa forestal, la compensación sobre el nuevo CO₂ introducido por la combustión fósil también es nula. Por tanto, la única opción para los combustibles fósiles es dejar de quemarlos.⁴⁵¹

Del mismo modo también tenemos opción de introducir escalones negativos en la cantidad de CO₂ atmosférico si desplazamos el equilibrio del ciclo del carbono hacia el carbono incorporado en la biomasa, pero hay que ser cautelosos en su alcance y valoración. En el caso de incorporar madera en componentes de los edificios (vigas, marcos de ventanas, puertas, aislamientos, muebles, etc.) nos encontramos con dos opciones en función de que la madera empelada provenga o no de explotaciones sostenibles:

- Si la madera no proviene de explotaciones sostenibles, su incorporación en productos para los edificios puede introducir un escalón de reducción de CO₂ en la atmósfera que, en todo caso, se mantendrá tan solo mientras se mantenga esa nueva actividad⁴⁵², para revertirse al cesar esta actividad. El desarrollo del escalón se iniciaría en cualquier caso, no al iniciar la nueva actividad, sino que aparecería desfasado un tiempo igual al del tiempo de retención del uso original de la madera⁴⁵³, y se prolongaría durante un periodo igual a la diferencia entre los tiempos de retención del nuevo uso de la madera y del uso original. Pero dado el elevado tiempo de retención del “uso” original de esa madera, según cuál sea el nuevo uso, cabe incluso la posibilidad de que el escalón, en lugar de ser negativo, fuera positivo, es decir, incrementara el desplazamiento de carbono de la biosfera hacia la atmósfera. Y en cualquier caso, dado que ambos tiempos de retención son, en el mejor de los casos, de igual

orden de magnitud, el potencial escalón favorable es muy pequeño, y su efecto no llegaría hasta transcurridos unos 200 años. Estos argumentos hacen injustificable el uso de madera procedente de plantaciones no sostenibles de acuerdo con argumentos de reducción de CO₂ atmosférico.

- En el caso de que la madera provenga de explotaciones sostenibles, su incorporación en productos para los edificios produce un escalón de reducción del CO₂ atmosférico por desplazamiento desde la atmósfera a la biomasa. La magnitud máxima de este escalón de reducción es igual al producto del tiempo de retención de la nueva aplicación de la biomasa (del orden de 300 años) por el volumen de la actividad en términos de tasa de fijación de CO₂. Si la actividad se mantiene durante un tiempo igual o superior al de retención de ese nuevo uso de la biomasa, el escalón se desarrolla completamente, y a partir de ese momento el escalón se mantiene hasta el momento en que se interrumpa la actividad, instante a partir del cual el escalón empezaría a revertirse en un proceso que se prolongaría durante un periodo igual al tiempo de retención de ese nuevo uso de la biomasa. Por tanto, si bien esta actividad no genera un escalón definitivo por la imposibilidad de garantizar su mantenimiento para siempre, sí que tiene el potencial de proporcionar una contribución positiva a la estabilización del sistema climático, con escalones negativos en la cantidad de CO₂ en la atmósfera, que se pueden prolongar más allá de los 600 años, a lo cual hay que añadir que estos productos elaborados con biomasa sustituyen en el edificio a productos elaborados con otros materiales (aluminio, hierro, plásticos, etc.) con un importante impacto en términos energéticos y de carbono.

sea mejor que la biomasa, pues a diferencia del carácter reversible del escalón en concentración atmosférica de CO₂, asociado a la combustión de esta biomasa, la combustión de productos fósiles genera un escalón irreversible al incrementar la cantidad de carbono en el ciclo del carbono. El objeto de la comparativa es ubicar la magnitud del impacto sobre las emisiones y el desplazamiento de CO₂ a la atmósfera.

447 Que por otro lado es la situación a la que conduce el emplear indicadores del desempeño de los edificios basados en emisiones de CO₂ junto a la consideración de neutralidad de emisiones de la biomasa.

448 Evaluación realizada de acuerdo con el escenario BAU desarrollado en este informe.

449 Nótese que este requerimiento de “no sustitutivo”, dentro del cual se incluye la fijación de biomasa en ecosistemas naturales, puede limitar bastante el potencial de los cultivos energéticos.

450 Entre las que se incluiría también la biomasa que no proceda de cultivos energéticos sostenibles, para la cual el tiempo de retención del uso anterior sería la suma del resto de vida útil que le quedaba a la especie vegetal cuando fue recolectada, el incremento de fijación de CO₂ que durante este periodo hubiera podido realizar, y el tiempo de degradación natural: es decir, fácilmente del orden de 150-200 años.

451 La viabilidad técnica y económica de recurrir a la captura y almacenamiento de carbono para poder seguir quemando combustibles fósiles no está demostrada, y en caso de estarlo solo podría añadir reversibilidad al proceso si se pudiese garantizar la permanencia del carbono capturado por un tiempo igual o superior al de su fosilización (Greenpeace, 2008).

452 Producción de muebles por ejemplo, y siempre que la actividad dure por lo menos el tiempo necesario para que se desarrolle el escalón.

453 Que puede ser bastante elevado, pues incluiría el resto de vida útil de los árboles talados, más el tiempo de degradación natural de la madera, y por tanto puede llegar a ser del orden de 200 años o superior. Es más, durante el resto de vida útil del árbol talado, éste hubiera seguido fijando CO₂ de la atmósfera, aspecto que es equivalente a considerar que todavía se prolongara más el tiempo de retención del uso original de esa biomasa.

3.7.1.6 Los grandes cambios pendientes

En el siguiente punto ilustraremos la importancia del sector edificación en el sistema energético, así como la relevancia de la ingeniería bioclimática para acotar la demanda energética de este sector, y las opciones, potencial y limitaciones de la cobertura de la demanda energética del sector con energías renovables.

Sin embargo, para desarrollar los potenciales en realidades es preciso introducir los mecanismos apropiados que modifiquen las tendencias y catalicen el cambio deseado.

Algunos de estos mecanismos podríamos clasificarlos como mecanismos de respuesta lenta por los dilatados periodos de tiempo⁴⁵⁴ requeridos para que consigan cristalizar un cambio significativo en la dirección deseada. Dentro de esta categoría entrarían la regulación energética (CTE), los mecanismos de certificación oficial, y los mecanismos de certificación voluntaria (LEED, BREEAM, etc.)⁴⁵⁵. Más allá de las limitaciones asociadas a la forma actual de la regulación y certificación oficial en España, todos estos mecanismos comparten la característica común de tener una “respuesta lenta”, y por tanto una capacidad limitada de catalizar la evolución necesaria del sector en los periodos de tiempo disponibles.

Por tanto, es preciso poner en juego otros mecanismos de respuesta rápida para producir la evolución necesaria en el periodo de tiempo disponible. Sorprendentemente, estos mecanismos de respuesta rápida están empezando a asomar justo en este momento en el que se han convertido en imprescindibles dada nuestra incapacidad de activar a tiempo los mecanismos de respuesta lenta. El desafío es ahora conseguir facilitarles el camino

para que se incorporen en nuestros sistemas y permitan materializar el cambio en escalón que necesitamos. La gran mayoría de estos mecanismos de respuesta rápida que pueden incidir sobre el sector edificación, y que permiten configurar el contexto E3.0, están relacionados con el amanecer de la inteligencia en el conjunto de nuestros sistemas y sus interacciones. Inteligencia que en primera instancia asociamos a los sistemas técnicos (redes inteligentes, sistemas de transporte inteligentes, edificios inteligentes, etc.), pero que realmente debe extenderse más allá, y abarcar los sistemas económico, político y social, para realmente poder constituirse en un mecanismo de respuesta rápida con capacidad de potenciar el cambio en el dirección deseada. En (García-Casals, X., 2009) se presentan algunos ejemplos de cómo se podría articular este despliegue de inteligencia inter-sistémico.

3.7.1.7 Escenarios y potencial de ahorro e integración de renovables de estudios anteriores

En este punto recogemos los resultados de algunos escenarios previos relativos a la capacidad de ahorro del sector edificación y a la integración de renovables en el mismo, con el fin de contextualizar los resultados más detallados que expondremos más adelante, y para ilustrar algunos aspectos concretos relativos a la incorporación de consideraciones de sostenibilidad en el sector de la edificación. En (García-Casals, X., 2009) se pueden encontrar los resultados de otro escenario de evolución de la demanda energética e integración de renovables en el sector de la edificación, bajo la perspectiva del potencial de incentivar nuevos modelos de negocio basados en la eficiencia energética.

⁴⁵⁴ Esto es especialmente cierto en el sector edificación, dada su elevada inercia y su carácter difuso.

⁴⁵⁵ LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) son dos metodologías de certificación de edificios con un alcance mucho más integral que la certificación energética de edificios oficial en España, y aunque están demostrando un potencial de movilización del mercado de la edificación, en la dirección de la sostenibilidad, superior al de la certificación oficial, siguen constituyendo mecanismos de respuesta lenta por el elevado periodo de tiempo que debería transcurrir hasta que ejercieran un impacto significativo sobre el sector de la edificación en su conjunto.

Los escenarios energéticos que vamos a reproducir a continuación para el sector edificación son bastante conservadores, en el sentido de que el potencial de ahorro es significativamente superior al recogido por estos escenarios⁴⁵⁶, tal y como muestra, por ejemplo, la planificación regulatoria para el sector edificación en el Reino Unido (apuntando a la neutralidad de los edificios para los años 2016-2019). Sin embargo, estos escenarios nos permiten tener una primera evaluación cuantificada de cómo puede desarrollarse el sector de la edificación si lo mantenemos en una trayectoria BAU, o si introducimos en el mismo medidas de eficiencia orientadas a objetivos.

Escenarios de demanda y potencial de la ingeniería bioclimática

La herencia que nos han dejado los elevados ritmos de crecimiento del sector edificación en nuestro país hasta el año 2009 (edificación anual por encima de 100 km²/año), junto al hecho de que en la actualidad su demanda energética se encuentra lejos de estar totalmente internalizada, hacen que este sector pueda pasar a ser, con diferencia, el dominante, desde el punto de vista de la demanda energética, y por tanto a condicionar en gran medida nuestras posibilidades de reconducir nuestro modelo de desarrollo hacia la sostenibilidad. Esto es especialmente cierto en el caso de que el sector del transporte evolucione hacia el contexto E3.0, mientras que el de edificación no sea capaz de materializar una transición de este estilo.

Ante esta situación, y habida cuenta de la ausencia de escenarios oficiales⁴⁵⁷ sobre la evolución del sector, resulta interesante desarrollar escenarios de demanda energética del sector de la edificación y utilizarlos para valo-

rar el papel que pueden jugar las herramientas disponibles a nuestro alcance (energías renovables, ingeniería bioclimática) para alcanzar los objetivos perseguidos. La comparación de estos resultados con la planificación actual nos permitirá poder valorar su idoneidad y vislumbrar los cambios requeridos.

Previo a plantearse el uso de energías renovables activas en los edificios, se debe apurar el potencial de ahorro y eficiencia que nos proporciona la ingeniería bioclimática⁴⁵⁸. De hecho, podríamos entender la aportación de la ingeniería bioclimática como la de las formas pasivas de energías renovables⁴⁵⁹ a integrar en el edificio. El potencial de una buena ingeniería bioclimática es tremendo, y en determinados casos puede llegar a edificios pasivos con demanda nula de energía, de tal forma que al integrar en ellos elementos activos de energías renovables, el edificio se nos convierta en un generador neto de energía, e invertir radicalmente la situación actual.

Con el fin de enmarcar correctamente el peso del sector edificación en España, en (García-Casals X., 2007-2) se presentaron los resultados de escenarios (nivel de detalle provincial) de demanda energética en el sector edificación de cara al año 2050, con el fin de poder valorar tanto el peso absoluto que cabe esperar que adquiera este sector, como el potencial de ahorro que podría alcanzarse mediante la ingeniería bioclimática y la aplicación de tecnologías de energías renovables.

El escenario está basado en la proyección de la superficie edificada desarrollada en (GP, 2005), asumiendo que la tasa de crecimiento neto anual de la superficie edificada alcanza un valor máximo en torno al año 2010 para posteriormente tender hacia cero en el año 2050, en el cual se alcanzaría un equilibrio

⁴⁵⁶ De hecho, estos escenarios anteriores corresponden a un análisis mucho menos detallado del que hemos acometido en este informe, por lo que no era posible afinar tanto en el potencial de ahorro manteniendo una correlación directa con las implicaciones tecnológicas asociadas.

⁴⁵⁷ Así como la ausencia de una regulación energética de los edificios orientada a objetivos que por tanto nos permita cuantificar de forma directa dónde nos conduce la situación actual.

⁴⁵⁸ La ingeniería bioclimática analiza y evalúa la interacción energética del edificio con su entorno, sus sistemas y sus equipamientos, buscando soluciones que permitan cubrir los requerimientos de confort en los espacios habitables del edificio minimizando la demanda energética.

⁴⁵⁹ En sentido amplio, abarcando tanto los aportes energéticos pasivos procedentes del medio exterior, como todas aquellas "aportaciones negativas" asociadas a la implementación de medidas de eficiencia energética.

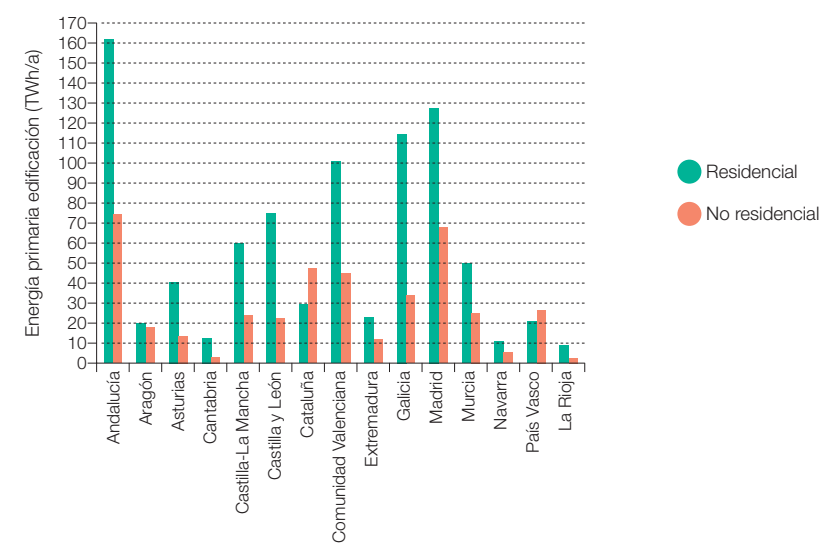
entre la construcción de edificaciones nuevas y la demolición de edificios antiguos.

Respecto a la demanda energética de este parque de edificios se desarrollan dos escenarios, uno BAU⁴⁶⁰ y otro de eficiencia, ambos asumiendo que se cubre completamente la demanda de confort de los edificios. El escenario BAU asume que el total⁴⁶¹ del parque de edificios en 2050 cumple⁴⁶² los límites actualmente impuestos por el CTE para las demandas energéticas reguladas⁴⁶³. Para el resto de las demandas energéticas se asumen valores tipo. El escenario eficiente asume que para 2050 se alcanza en el promedio del parque de edificios el estándar de Passiv Haus⁴⁶⁴, y que también se consigue acotar la demanda energética de los equipamientos, y de forma muy

conservadora⁴⁶⁵ considera para pasar a energía primaria que el rendimiento medio de generación y transporte del sistema eléctrico se mantiene en 2050 igual al del escenario BAU (45%). Las figuras 221 y 222 recogen la distribución por CCAA de la demanda energética del parque de edificios para los casos BAU y eficiente.

En la figura 223 mostramos los resultados finales de los dos escenarios a 2050 en términos de energía primaria, comparados⁴⁶⁶ con la demanda energética del sector edificación en 2006 según la AIE. El escenario BAU, con sus 1275 TWh/a de consumo de energía primaria⁴⁶⁷ en 2050 se sitúa significativamente por encima de los 486 TWh/a según la AIE para 2006. Parte de este incremento se debe

Figura 221. Caso BAU: Demanda de energía primaria de los edificios residenciales y no residenciales para el año 2050, asumiendo que la envolvente de los edificios cumple la normativa actual y la anterior (CTE y NBE CT 79), y que prácticamente todos los sistemas de climatización experimentan una mejora significativa de rendimientos respecto a la situación actual (rendimiento estacional medio de calderas del 95% y COP estacional medio de bombas de calor en modo frío de 2.8), según (García-Casals, X., 2007-2).



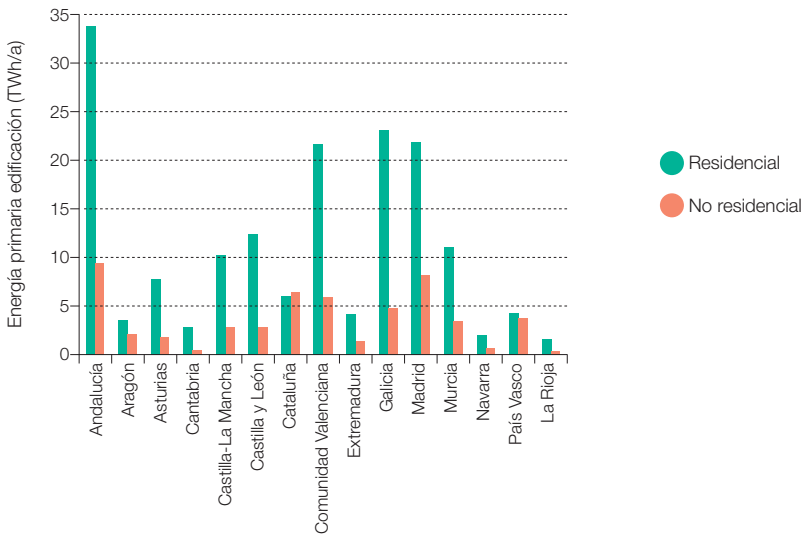
⁴⁶⁰ BAU: “business as usual”. Escenario que supone seguir con las tendencias actuales.

⁴⁶¹ Esto es, tanto edificios nuevos como los existentes que han sido rehabilitados hasta este nivel de exigencia. Por lo que respecta a la rehabilitación, esta hipótesis para el escenario BAU es bastante optimista habida cuenta de la situación actual de la rehabilitación energética de edificios en nuestro país.

⁴⁶² Por lo que respecta a los sistemas, y para todo el parque de edificios, se asume que el rendimiento medio estacional de las calderas es del 95% (gran mejora respecto a situación actual), que el COP estacional de los equipos de frío es de 2,8 (también gran mejora respecto a situación actual, con el agravante de que el RITE no impone valores mínimos para este parámetro), y que el rendimiento medio de generación y transporte del sistema eléctrico asciende hasta un 45% en 2050.

⁴⁶³ La distinción entre demandas reguladas y no reguladas es bastante imprecisa en nuestro país. En rigor, estableceríamos como “reguladas” aquellos componentes de la demanda sobre los cuales existen límites regulatorios que acotan de forma directa su valor. Pero en estas condiciones, ninguno de los componentes de demanda se podrían considerar regulados, dado el carácter de limitación relativa que impone el CTE incluso sobre las demandas de la envolvente. En sentido más laxo entenderemos como demandas reguladas las de calefacción y refrigeración (aunque las limitaciones sobre la refrigeración son aún mucho más laxas e incluso inexistentes, tanto a nivel de envolvente como a nivel de equipos). El resto de demandas energéticas las denominaremos no reguladas, y estarían constituidas por el ACS, la iluminación, los equipamientos, la ventilación y el bombeo. El término “no regulada” debe entenderse como que la regulación no impone límites directos sobre el valor absoluto de la demanda. Sobre algunas de estas demandas no reguladas, el CTE no impone limitación alguna (equipamiento, bombeo, iluminación residencial, etc.), sobre otras impone tan solo limitaciones parciales (resto iluminación), sobre otras impone limitaciones poco exigentes (ventilación), y sobre otras, como el ACS, se imponen límites sobre la cobertura renovable pero no quedan establecidos los límites

Figura 222. Caso eficiente: Demanda de energía primaria de los edificios residenciales y no residenciales para el año 2050, asumiendo que todo el parque de edificios responde al límite de la clase-A del etiquetado energético propuesto en (PREDAC, 2003), que las demandas eléctricas para equipamiento no cubiertas localmente con generación renovable ascienden a 5 kWh/m2-a para los edificios residenciales y a 10 kWh/m2-a para los edificios no residenciales, y que el rendimiento medio del sistema de generación y transporte eléctrico peninsular se sitúa en el 45%., según (García-Casals X., 2007-2).



sobre la demanda absoluta para todas las situaciones posibles, y los límites de cobertura renovable pueden ser eludidos (normativa municipal, casos particulares edificios, etc.).

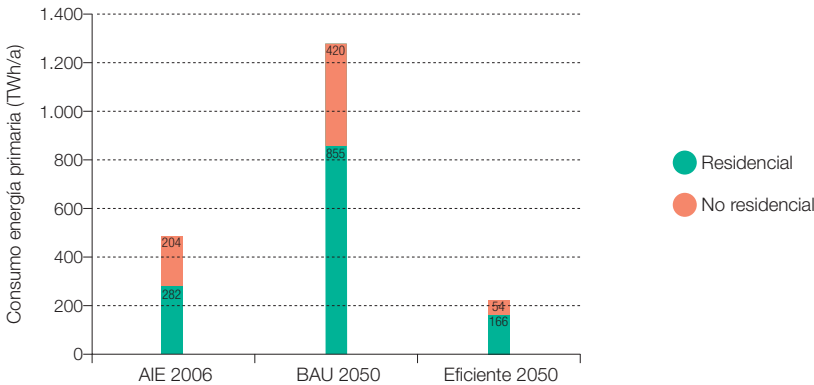
464 Estándar ya adoptado por algunos países como Suecia y varios lugares de Alemania, y que incluso se ha planteado imponer a nivel de normativa Europea. Todavía es posible, y más en el escenario temporal 2050, el llevar el nivel de ahorro más allá de estos valores, tal y como muestran los requerimientos de neutralidad de carbono en 2016 del nuevo contexto regulatorio del Reino Unido, y los resultados detallados que desarrollaremos en este informe.

465 Para 2050 lo coherente con el nivel de reducción de emisiones de GEI que se están planteando es que prácticamente el 100% del sistema eléctrico esté cubierto con renovables, motivo por el cual el rendimiento medio del sistema eléctrico sería muy superior a estas cantidades.

466 La comparación no puede ser en términos absolutos porque los valores de (AIE, 2006) son para el total nacional, y los escenarios a 2050 se desarrollaron para la España peninsular. Pero sí que nos sirve para ubicar en términos cualitativos los dos escenarios presentados.

467 Para encuadrar correctamente estos resultados conviene compararlos con la demanda de energía total peninsular, que en el año 2003 alcanzó 1482 TWh/a en términos de energía primaria, y que proyectada tendencialmente al año 2050 (García-Casals,X., 2005) alcanza 2252 TWh/a en términos de energía primaria.

Figura 223. Comparativa consumo energía primaria del sector edificación actual (AIE, 2006) y de los escenarios a 2050 desarrollados en (García-Casals X., marzo/abril 2007).



a la internalización del conjunto de la demanda de confort, y otra al crecimiento del parque de edificios. Por el contrario, el escenario eficiente muestra un consumo de energía primaria de 220 TWh/a, del orden de la mitad del actual.

El ahorro en el sector edificación asociado a la aplicación de la ingeniería bioclimática, estos, del uso de las energías renovables pasivas⁴⁶⁸, quedaría por tanto valorado para el año 2050 en 1055 TWh/a, quedando 220 TWh/a de demanda de energía primaria que construirían el potencial campo de aplicación de las energías renovables activas en el sector edificación. De estos resultados podemos extraer dos conclusiones:

- El mayor potencial de reducción de emisiones en el sector de la edificación se encuentra en la ingeniería bioclimática.
- Si las energías renovables activas se aplican al sector edificación habiendo apurado el potencial de la ingeniería bioclimática, es factible plantearse la inversión de la situación energética del sector edificación, pasando de un consumidor neto de energía primaria a un productor neto de energía.

Potencial de las energías renovables en el sector edificación

Para cubrir la demanda energética del sector edificación con energías renovables disponemos de dos aproximaciones distintas: por un lado tenemos la aproximación tradicional basada en la implementación de sistemas energéticos en los propios edificios o su entorno inmediato para el uso local de la energía producida⁴⁶⁹ (sistemas solares térmicos y sistemas de biomasa), que denominaremos la *opción autónoma*⁴⁷⁰. Por otro lado existe la

opción que denominaremos *opción interconectada*⁴⁷¹, basada en el hecho de que para cumplir con las restricciones de sostenibilidad el sector de generación eléctrica evolucionará⁴⁷² hacia sistemas de generación basados en tecnologías renovables. La opción interconectada plantea cubrir la demanda del sector edificación mediante electricidad, apoyándose en una red eléctrica inteligente e introduciendo una participación activa de la gestión de la demanda. Los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica caerían dentro de la opción centralizada, pues su ubicación física es distribuida en los propios edificios, pero el elemento fundamental que les permite proporcionar una contribución significativa al sistema energético es la existencia de una red eléctrica interconectada e inteligente.

Potencial y limitaciones de la generación renovable autónoma

En este apartado, según los resultados de los escenarios anteriormente expuestos para la demanda energética del sector edificación en el año 2050, revisamos los requerimientos de desarrollo de las energías renovables en una aproximación autónoma.

Por lo que respecta a la biomasa, en los últimos años hemos asistido a un despegue de las aplicaciones térmicas en el sector de la edificación, fundamentalmente mediante la introducción en el mercado de calderas de biomasa procedentes de centro Europa⁴⁷³ y países escandinavos, en los que ya existe una larga tradición del uso de estas calderas para cubrir la demanda térmica del sector edificación. Este despegue se ha visto potenciado por la entrada en vigor del CTE, dado que las calderas de biomasa permiten cubrir los requerimientos de la HE4 (aporte solar térmico)

⁴⁶⁸ Entendido en sentido amplio, como anteriormente indicamos, para incorporar los aportes pasivos del entorno y la eficiencia.

⁴⁶⁹ Dentro de esta categoría caerían también los sistemas fotovoltaicos autónomos, es decir, aquellos que no están conectados a la red eléctrica e incorporan un banco de baterías para acoplar localmente la generación con la demanda. Sin embargo, consideramos que esta opción tecnológica carece de sentido allí donde llegue la red eléctrica, tanto por costes como por eficiencia en el uso de los módulos fotovoltaicos, y más en el contexto de una red eléctrica que evoluciona hacia niveles crecientes de inteligencia. Adicionalmente consideramos que el grueso del parque de edificios se encontrarán interconectados a la red eléctrica. Las aplicaciones fotovoltaicas autónomas seguirán teniendo sentido en los edificios aislados de la red eléctrica, pero el impacto energético de estos edificios sobre el total del parque lo consideramos despreciable. Respecto a los sistemas geotérmicos y aerotérmicos, dado que emplean electricidad con un COP muy inferior al de un sistema solar térmico o de biomasa bien diseñados, los consideraremos como sistemas centralizados por requerir de un aporte significativo de electricidad de la red para facilitar el aprovechamiento del recurso térmico ambiental distribuido: es decir, en los sistemas solares térmicos se consume una pequeña cantidad de electricidad para la operación de algunos equipos secundarios (como las bombas de circulación), pero la captación del recurso renovable no está tan estrechamente vinculado a este consumo de electricidad (incluso puede prescindir de él en un sistema por termosifón) como en una bomba de calor, en la que el consumo del compresor es un componente fundamental para elevar (bombear) la energía térmica desde el foco frío al caliente.

⁴⁷⁰ En la referencia original denominábamos a ésta la *opción descentralizada*, aludiendo al hecho de su independencia del sistema de generación eléctrica centralizado. Sin embargo, en este estudio adoptamos el término "autónoma" para resaltar el elemento diferencial que permanece cuando el sistema eléctrico evoluciona alejándose de la generación centralizada.

sin las limitaciones de la energía solar térmica, y la reconversión de las empresas asociadas a las calderas de carbón en la edificación. Desde los inicios de la entrada de la biomasa térmica en el sector edificación de nuestro país, se han hecho intentos⁴⁷⁴ para explorar la extensión de las fuentes de biomasa más allá de los combustibles tradicionalmente empleados en los países de origen de la tecnología (pellets y astillas de madera), a otras fuentes de biomasa residual disponibles en nuestro país (cáscaras de almendra, huesos aceituna, cáscaras piñón, etc.). Es difícil de conocer actualmente la extensión que ha alcanzado el uso de la biomasa térmica en el sector edificación en nuestro país por la falta de registro de las instalaciones⁴⁷⁵, aunque seguramente su aportación actual será muy inferior a los objetivos del PER para 2010 (28,6 TWh/a).

Sin embargo, por lo que respecta al uso energético de la biomasa en el sector edificación, es preciso contextualizarlo en relación a la disponibilidad de este recurso en nuestro país, con el fin de evaluar hasta qué punto es apropiado y sostenible plantear la cobertura de la demanda energética del sector edificación con biomasa. En (GP, 2005) se presenta una evaluación del potencial total de todas las energías renovables en la España peninsular. Por lo que respecta a la biomasa, la evaluación del potencial disponible apura al máximo las posibilidades, e incorpora, además de las categorías convencionales de biomasa, un planteamiento de máximos en los cultivos energéticos y la valorización energética del monte bajo. La conclusión principal obtenida es que la biomasa es en nuestro país un recurso relativamente⁴⁷⁶ escaso que tiene muchas aplicaciones potenciales, y que, por tanto debe emplearse con mucha precaución.

Cuantificando estos aspectos, el techo del potencial de biomasa disponible es de 426 TWh/a

en términos de energía primaria⁴⁷⁷. Explotar al máximo este potencial requeriría emplear un 21,5% del territorio peninsular. En la figura 224 mostramos en valor relativo este recurso de biomasa frente a la demanda del sector edificación⁴⁷⁸. Como podemos observar, incluso tomando como base la demanda térmica del sector edificación en el año 2006 (datos AIE), el total del recurso disponible es del orden del total de la demanda, y en relación al escenario BAU para el año 2050 de la demanda del sector edificación, el recurso de biomasa disponible ascendería tan solo a un 44,5% de la demanda térmica del sector edificación. Si además tenemos en cuenta que la biomasa energética tendrá que jugar un papel fundamental⁴⁷⁹ en la reconversión del sistema eléctrico y del transporte hacia la sostenibilidad, resulta evidente que las aplicaciones térmicas directas⁴⁸⁰ de la biomasa no constituyen una solución apropiada⁴⁸¹ para el conjunto del sector edificación en nuestro país⁴⁸².

Por lo que respecta a la energía solar térmica aplicada en el sector edificación, el primer aspecto a tener presente es que requiere de una fuente energética auxiliar de apoyo para mantener un factor de capacidad suficientemente elevado que permita justificar su inversión. En el contexto de generación autónoma basada en renovables, la única opción para el sistema de apoyo es emplear biomasa.

En (García-Casals, X., 2007-1) se presenta una primera evaluación de los requerimientos de recurso a emplear para cubrir la demanda energética del sector edificación con energías renovables autónomas. Por lo que respecta a la demanda de energía térmica (calefacción, refrigeración⁴⁸³ y ACS) se plantea su cobertura mediante un sistema híbrido solar-biomasa, diseñado⁴⁸⁴ para proporciona una fracción solar del 35%⁴⁸⁵ con un factor de capacidad del sistema solar del 20%. En

471 En la referencia original denominábamos a ésta la *opción centralizada*. Sin embargo, el concepto "centralizado" hay que entenderlo de forma distinta al actual, pues la generación de la red eléctrica va a estar mucho más distribuida (incluso localizada en los propios edificios), y la característica diferencial de inteligencia también se encontrará distribuida por la red. Por este motivo, y para resaltar su característica diferencial de flujo bidireccional de información y energía con el resto del sistema energético, hemos optado por denominar a ésta la *opción interconectada* en el marco de este estudio.

472 Y muy probablemente en plazos sensiblemente inferiores a los del sector edificación.

473 Especialmente austriacas.

474 Estos intentos no han estado exentos de problemáticas asociadas al uso de quemadores no apropiados para estas fuentes de biomasa.

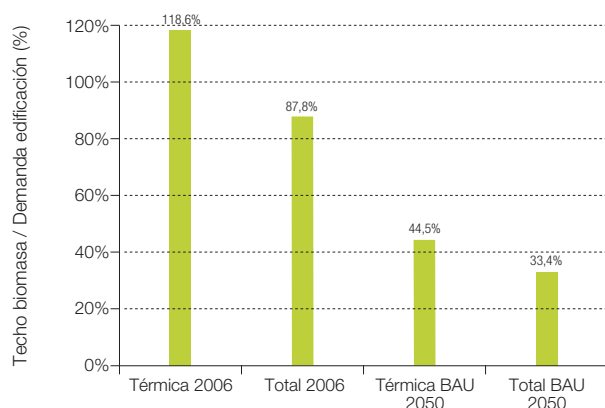
475 En diciembre de 2009, la asociación para la valorización energética de la biomasa (AVEBIOM) lanzó la iniciativa de crear un observatorio de calderas de biomasa. Los resultados publicados por el Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa (ONCB) correspondientes a septiembre de 2010 (Ramos J. J., 2010), indican que a fecha de septiembre de 2010 el ONCB tenía registrada una potencia total de 450 MW, de los cuales del orden del 60% asumimos que corresponden al sector edificación (el resto está en aplicaciones industriales), lo que proporciona una potencia de 270 MW, para la que podríamos estimar una generación del orden de 1 TWh/a para el año 2010.

476 Resulta escaso en comparación con otros recursos renovables como el solar o el eólico, pero en valor absoluto representa un recurso energético significativo.

477 Este es el valor total incluyendo la biomasa residual y el biogás. Dentro de este recurso total, los cultivos energéticos, los cultivos forestales de rotación rápida y el aprovechamiento del monte bajo representan un potencial de 273 TWh/a.

478 Para disgregar la demanda térmica, hemos supuesto que la demanda de refrigeración se cubre con máquinas de absorción de simple efecto con un COP = 0,6. Sería posible cubrir la demanda de refrigeración mediante energía térmica de forma más eficiente empleando máquinas de doble efecto (COP = 1,3), pero la realidad de la gran mayoría de

Figura 224. Techo energético de la biomasa peninsular según (GP, 2005) como porcentaje de la demanda energética del sector edificación. Los valores para el año 2006 son los correspondientes al balance de la AIE para ese año.



estas condiciones, para cubrir la demanda energética del escenario BAU sería preciso instalar 210 Mm² de colectores solares y emplear 678 TWh/a de biomasa para complementar el aporte solar. Por lo que respecta a la superficie de colectores solares requerida, está abismalmente alejada del objetivo actual del PER para 2010⁴⁸⁶ (4,9 Mm²), y su instalación en las cubiertas del parque de edificios⁴⁸⁷ proyectado para el año 2050 podría entrar en conflicto con los requerimientos de superficie para cubrir la demanda eléctrica de los edificios incluso⁴⁸⁸ con fotovoltaica conectada a la red eléctrica. En cuanto al requerimiento de biomasa para complementar el aporte solar, la cantidad necesaria en este escenario BAU sigue siendo superior al techo del recurso disponible⁴⁸⁹, por lo que su aplicación resultaría inviable.

A la vista de estos resultados, resulta evidente que un paso previo imprescindible para cubrir la demanda energética del sector edificación con energías renovables es explotar al máximo las posibilidades de la eficiencia energética y la ingeniería bioclimática

para acotar en origen la demanda energética del sector. Para la demanda del sector edificación en el escenario 2050 eficiente anteriormente presentado, la cobertura de la demanda de energía térmica mediante sistemas híbridos de solar térmica-biomasa requeriría emplear 93 TWh/a de biomasa e instalar 28,6 Mm² de superficie de captación⁴⁹⁰. Estos valores⁴⁹¹, aun siendo muy elevados respecto a las planificaciones actuales, ya quedan dentro del rango de lo que se puede considerar viable para el despliegue de esta tecnología⁴⁹².

Sin embargo, por lo que respecta a la biomasa, incluso en el contexto eficiente, este planteamiento autónomo requeriría emplear un 21,8% del techo de recurso total disponible, llegando a un 34,1% si consideramos el uso del potencial de cultivos energéticos, cultivos forestales de rotación rápida y aprovechamiento del monte bajo. Teniendo en cuenta los requerimientos de uso de biomasa en otros sectores energéticos sin otras alternativas basadas en energías renovables, estos porcentajes siguen siendo excesivos y difíciles de justificar.

las instalaciones comerciales que actualmente encontramos con refrigeración basándose en aporte térmico es que están apoyadas en máquinas de simple efecto.

479 Debe tenerse en cuenta que para algunas de estas aplicaciones, la biomasa es la única fuente renovable disponible y, por tanto, resulta prioritario reservar este recurso escaso para esas aplicaciones. Como ejemplos podemos citar aquellos modos de transporte que no se prestan a su electrificación (avión, transporte mercancías por barco y transporte de mercancías a larga distancia por carretera), y la regulación del sistema de generación eléctrica mediante hibridación de centrales termosolares.

480 Las aplicaciones de cogeneración distribuida basándose en biomasa pueden tener su nicho en el sector edificación bajo el contexto de un sistema energético basado en energías renovables.

481 Nos referimos aquí a que la biomasa térmica directa no puede contemplarse como una solución apropiada para el conjunto del parque edificatorio en nuestro país a largo plazo, dada la escasez del recurso. Sin embargo, debido a la inmediatez de su disponibilidad, sí que puede constituir una opción adecuada para el proceso de transición, pudiendo permanecer en el futuro como solución adecuada para una parte relativamente pequeña del parque de edificios.

482 A este respecto también resulta apropiado apuntar que los objetivos de biomasa del PER para 2010, en términos relativos al techo del recurso peninsular disponible según (GP, 2005), son del 11,1% para las aplicaciones térmicas, del 15,3% para las aplicaciones eléctricas, y del 6,0% para el transporte, de tal forma que en total el PER plantea emplear un 32,3% del máximo recurso disponible de biomasa. Este porcentaje de techo de recurso disponible a desarrollar es tremendamente superior al planteado para cualquiera de los otros recursos renovables disponibles en nuestro país, especialmente por lo que respecta a las tecnologías solares, por lo que incluso aunque se llegarán a alcanzar los objetivos del PER, cabría esperar poco desarrollo adicional de este recurso.

483 En este caso, incluso asumimos que hay una importante penetración de máquinas de absorción de doble efecto, de tal forma que el COP medio de todos los

Estos comentarios no deben interpretarse como un juicio de valor desfavorable en relación a los esquemas actuales de apoyo a estas opciones autónomas de cobertura de la demanda energética con energías renovables, sino tan solo como una perspectiva de sus limitaciones de cara al escenario que se puede desplegar para el año 2050, y una llamada de atención sobre el hecho de que para esos horizontes será preciso incorporar otros elementos en el sistema energético para conseguir cubrir toda la demanda con energías renovables. Pero dentro del proceso de transición hacia ese futuro, mientras el sistema eléctrico no sea 100% renovable y no hayamos conseguido introducir suficientes medidas de eficiencia en el sector edificación como para que su electrificación no requiera un sobredimensionado de las infraestructuras de generación y transporte, los sistemas autónomos como la solar térmica pueden desempeñar un papel muy importante, al actuar como limitadores en origen de la demanda sobre el sistema eléctrico, propiciando una senda de transición gradual mediante sistemas híbridos en los que el complemento al aporte local de la solar térmica se cubra con una bomba de calor. En este sentido, los esquemas actuales de apoyo de la tecnología solar térmica autónoma, y su mejora ligando el apoyo a las prestaciones reales mediante una retribución de la energía aportada por el sistema, constituyen herramientas adecuadas para propiciar y acompañar la transición desde el contexto BAU al contexto eficiente.

Integración del sistema energético y despliegue del gran potencial del sector edificación

Las opciones autónomas y sectoriales para cubrir la demanda energética del sector edificación con energías renovables presentan

limitaciones al plantearse la cobertura total de la demanda y requieren, tanto por eficiencia como por costes, iniciar una transición hacia un enfoque integrado del sistema energético.

Por un lado está el tema de la accesibilidad a los recursos renovables dominantes en nuestro país. El sistema eléctrico está evolucionando rápidamente hacia la integración de renovables a gran escala, por lo que la integración del sector edificación con el sistema eléctrico libera una gran cantidad de recursos renovables para su aplicación directa a la cobertura de la demanda energética del sector edificación, y elimina las restricciones en disponibilidad de recurso que analizábamos en el apartado anterior. En efecto, los valores del potencial de generación eléctrica de origen renovable en la España peninsular (GP, 2005) son de 569 TWh/a para la fotovoltaica integrada en los edificios, y de 15798 TWh/a para el conjunto de renovables. En relación a los niveles de demanda del año 2006 (AIE 2006) y del BAU para el año 2050⁴⁸³, integrando el sector edificación con el sistema eléctrico mediante la electrificación de la demanda térmica empleando bombas de calor eficientes⁴⁸⁴, la figura 225 nos muestra la cantidad de recurso disponible que deberíamos emplear para cubrir el total de la demanda energética del sector edificación. Como podemos observar, incluso recurriendo tan solo al recurso de la fotovoltaica integrada en la edificación en principio podríamos plantear la cobertura de la demanda⁴⁸⁵, pero el mayor potencial reside en la posibilidad de acceder al conjunto de recursos renovables de nuestro país, que nos permiten cubrir la demanda energética del sector edificación empleando cantidades relativamente bajas⁴⁸⁶ del recurso total disponible y con costes muy inferiores a los que supondría un enfoque autónomo (García-Casals, X., 2006-2).

sistemas de frío solar (máquinas de simple y doble efecto) es de COP = 1.

484 Condiciones que se corresponden aproximadamente a las que optimizan un combisystem en la Comunidad de Madrid desde el punto de vista de minimizar el coste normalizado de la energía térmica de origen solar.

485 Nótese que esta fracción solar es considerablemente inferior a la exigida por la HE4 del CTE, pero a diferencia del CTE en que esa fracción solar se refiere tan solo a la cobertura de ACS, nosotros aquí la estamos planteando para la cobertura del total de demanda térmica (calefacción + refrigeración + ACS).

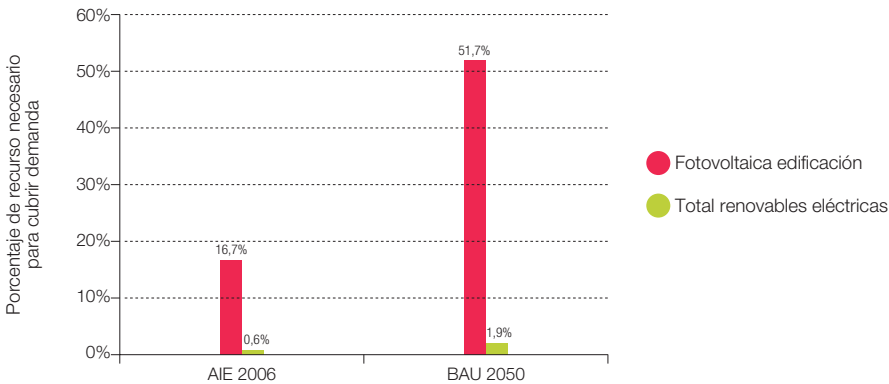
486 Objetivo del cual nos hemos quedado muy alejados. Sin embargo esta situación probablemente haya sido en parte debida a la falta de un mecanismo de incentivación más efectivo.

487 Tomando como dato de partida la estimación de superficie de cubierta del parque de edificios generada en (GP, 2005), y considerando tan solo los requerimientos de espaciado de los colectores con orientación óptima para evitar sombreadamientos (realmente en la cubierta de los edificios hay otras restricciones que reducen todavía más la superficie de colectores a instalar), el requerimiento de 210 Mm² de colectores solares correspondería a ocupar el 38,6% de la superficie de cubiertas en el año 2003 y el 25,9% de la superficie de cubiertas proyectada para el año 2050. Adicionalmente, los colectores térmicos pueden también instalarse en fachadas con la orientación adecuada, por lo que la instalación de esos 210 Mm² no resultaría inviable por disponibilidad de espacio, pero conduciría al requerimiento de uso de un porcentaje muy elevado de la superficie disponible y probablemente competiría con la instalación de fotovoltaica integrada en los edificios, requiriendo además un cambio radical en la implementación de mecanismos de incentivación de esta tecnología para alcanzar tasas de instalación muy superiores a las demostradas hasta la fecha.

488 El término "incluso" quiere reflejar aquí la mayor eficiencia tanto en ocupación de espacio como en producción de energía de la instalación fotovoltaica interconectada a la red eléctrica respecto a una instalación fotovoltaica.

489 El techo del recurso disponible es un 62,8% de la demanda de biomasa del sistema híbrido,

Figura 225. Cantidad de recurso de generación eléctrica de origen renovable que sería preciso emplear para cubrir los niveles de demanda en el año 2006 (AIE 2006) y tendencial (BAU 2050) del sector edificación vía electrificación de su demanda térmica con bombas de calor eficientes (COP = 6). Se muestran los resultados relativos al techo de generación de la fotovoltaica integrada en la edificación y del total de renovables, según (GP, 2005).



Por otro lado, esta integración del sector edificación en el sistema eléctrico también representa beneficios muy importantes para un sistema eléctrico basado en renovables, de tal forma que el sector edificación abandona su tradicional papel pasivo para convertirse en un importante actor activo que permita facilitar sistemas eléctricos 100% renovables. En efecto, tal y como se muestra en (GP, 2006) la operación de un sistema 100% renovable para cubrir la demanda eléctrica BAU de la España peninsular, si bien es técnicamente⁴⁹⁷ viable, implica la disipación de una gran cantidad de capacidad de generación eléctrica de origen renovable para regular el sistema eléctrico. Esta energía eléctrica “residual”, de coste adicional nulo, exige la integración del sistema energético para poder valorizar este recurso, tanto desde la perspectiva de la eficiencia técnica como económica.

Pero más allá de los planteamientos de acceder a un mayor potencial de generación renovable, y de evitar el sin sentido de tener que

disipar esa electricidad “residual”, consecuencia de la regulación de un sistema energético no integrado, la gran contribución activa del sector edificación en el contexto de un sistema energético basado en renovables es la que puede prestar mediante la gestión de la demanda de energía (GDE). En el escenario hacia el que estamos evolucionado, donde la integración a gran escala de renovables en la red eléctrica requiere el despliegue de inteligencia por el sistema, la gestión de la demanda desde un sector tan importante en cuanto a volumen de demanda como es el de la edificación, se convierte en un componente fundamental para poder regular y operar adecuadamente el sistema energético. En este contexto del sistema eléctrico, las “válvulas” que regulan la operación pasan de su ubicación centralizada tradicional⁴⁹⁸, a estar distribuidas por el conjunto de la red en los puntos de consumo. Y en esta situación, tan importante o más es la actuación desde la gestión de la demanda de energía para facilitar la integración de renovables en la red, como la

siendo de un 40,3% la contribución de la biomasa procedente de cultivos energéticos, cultivos forestales de rotación rápida y aprovechamiento del monte bajo.

490 Es preciso tener en cuenta que estos resultados son valores agregados para el conjunto de España. En los emplazamientos con mejor recurso solar la producción del campo solar es más elevada, y puede emplear diseños de mayor fracción solar que reducen el requerimiento de biomasa. Por tanto, dentro de la geografía española, hay emplazamientos donde esta opción autónoma resulta más favorable que en otros. Este es otro elemento distintivo entre las opciones autónoma e interconectada, pues en el caso de la cobertura de la demanda energética mediante energías renovables con un planteamiento interconectado, la diferenciación regional queda mucho más atenuada.

491 En términos de ocupación de la superficie de cubiertas de los edificios del escenario desarrollado en (GP, 2005), reteniendo tan solo los requerimientos de servidumbre para evitar sombreados entre los colectores, estos 28,6 Mm² representarían ocupar el 5,3% de la superficie de cubiertas en el año 2003 y el 3,5% de la superficie de cubiertas en el año 2050. Por tanto, vemos cómo la aplicación de medidas de eficiencia conduce el requerimiento de ocupación de superficie de cubiertas a unos valores mucho más realistas.

492 Aunque seguirían requiriendo una modificación de los mecanismos de incentiviación de esta tecnología para incrementar las tasas anuales de instalación significativamente por encima de las demostradas hasta la fecha.

493 Para el caso del escenario eficiente, en el que la demanda se reduce mediante la aplicación de la ingeniería bioclimática tal y como expusimos en puntos anteriores, los requerimientos de uso del recurso renovable disponible serían considerablemente inferiores.

494 Se han supuesto para esta evaluación valores del COP = 6, considerablemente superiores a los actualmente disponibles en nuestro país, pero inferiores a los que impone la regulación japonesa a partir de 2010.

495 Esta afirmación es tan solo por lo que respecta a la fracción del potencial que se debería emplear. Sin embargo, al igual que nos pasaba con la solar

propia generación a partir de fuentes de energías renovables.

Este planteamiento nos obliga a abandonar el enfoque actual en el que solo consideramos la instalación de equipos de energías renovables en los edificios como participación del sector edificación en la introducción de renovables. De ahora en adelante, y siempre que el despliegue de inteligencia por los sistemas político, administrativo y económico acompañen, la participación del sector edificación en la introducción de renovables se va a poder universalizar, de tal forma que cualquier consumidor en los edificios pueda contribuir a la integración de renovables en el sistema energético, independientemente de que exista la posibilidad de instalación de sistemas de generación in situ. Es más, este planteamiento nos proporciona herramientas para implementar los cambios en escalón (mecanismos de respuesta rápida) que necesitamos en el contexto actual de urgencia.

3.7.1.8 Iniciativas actuales de eficiencia energética en el sector edificación

El interés por los edificios de muy bajo consumo energético (VLEB⁴⁹⁹) probablemente empezó a coger fuerza con la crisis energética de los años 70 del pasado siglo, aunque su evolución en el último cuarto del siglo pasado no fue más allá de unas cuantas curiosidades sin impacto apreciable sobre el parque de edificios y con limitadas garantías de resultados.

Con la aparición del estándar Passiv Haus en 1988⁵⁰⁰ se añadió rigor al concepto de edificio de bajo consumo, así como una metodología y reconocimiento que ha permitido que los VLEB empiecen a dejar sentir su impacto en el sector edificación. En efecto, el estándar Passiv Haus⁵⁰¹ no solo cuenta ya

con un significativo parque de edificios⁵⁰², sino que también ha sido adoptado como estándar de referencia en Suecia y en varias ciudades Alemanas, y ha llegado al punto de que incluso desde la UE se han realizado propuestas para la incorporación de este estándar al conjunto de la UE para el año 2015⁵⁰³. Este estándar, si bien ha representado una mejora muy significativa respecto a las regulaciones energéticas existentes en los países de origen, tiene unas exigencias que desde la perspectiva de un contexto E3.0 podemos considerar limitadas, en especial por lo que se refiere a la elevada permisividad de consumo total de energía primaria.

A lo largo de los últimos años se ha desatado una actividad mucho más intensa en la implementación de estándares de VLEB que apuntan en un horizonte muy cercano a alcanzar los edificios de consumo cero (ZEB⁵⁰⁴) o incluso los edificios con generación neta de energía. En efecto, en países como el Reino Unido, Francia, Holanda y EE. UU., encontramos planificaciones⁵⁰⁵ encaminadas a que los nuevos edificios sean ZEB en horizontes de tiempo tan cercanos como 2015-2020.

El concepto de ZEB admite distintas interpretaciones⁵⁰⁶ según que se refiera a energía consumida o neta (descontando la generación local), a energía primaria o final, o que el indicador empleado sea de energía, emisiones o costes. Pero esencialmente se trata de edificios que producen un impacto nulo⁵⁰⁷ por lo que se respeta al consumo de energía.

El concepto de ZEB resulta atractivo desde un punto de vista mediático, y probablemente por esto se ha extendido tanto en los últimos tiempos. Pero desde una perspectiva global de un sistema energético integrado, el concepto ZEB no resulta prioritario, y por lo general no constituirá la solución

térmica, el despliegue de este potencial requeriría instalar una potencia fotovoltaica abismalmente alejada de la que actualmente tenemos instalada (del orden de 4 GW_p, unas 10 veces superior a la del PER 2010) y de la planificación energética para los próximos años (con un objetivo del orden de los 8 GW_p para el año 2020). En efecto, para cubrir la demanda del año 2006 este planteamiento requeriría instalar del orden de 83 GW_p, ascendiendo a unos 256 GW_p el requerimiento para la cobertura de la demanda del año 2050 en un contexto BAU (incluso empleando como es el caso tecnología de generación muy eficiente, representada por esas bombas de calor de elevado COP). Esta potencia fotovoltaica, para la tecnología considerada en (GP, 2005) implicaría instalar unos 1.520 km² de módulos fotovoltaicos que constituyen un 85% del área de cubierta para el año 2050 en el escenario desarrollado en (GP, 2005). Sin embargo, la comparación con el área de cubierta en estos términos no es adecuada, pues el potencial de fotovoltaica integrada en los edificios, evaluado en (GP, 2005), consideraba instalación en cubierta pero también en fachadas con acimut de 0°, 45° y 90°, motivo por el cual la superficie disponible era mucho más elevada que la de cubierta, y el factor de capacidad promedio más bajo que el correspondiente a la instalación en cubierta. Si evaluamos la superficie necesaria en el caso de que la instalación se realizara en cubierta a fin de poder comparar directamente con la evaluación anteriormente realizada para la solar térmica, para el escenario de demanda BAU necesitaríamos unos 201 GW_p de fotovoltaica, que al considerar las servidumbres por sombreados entre módulos nos conducirían a un requerimiento de superficie de cubierta de 2.280 km², es decir, un 127% de la superficie de cubierta para el año 2050. Este número todavía no es directamente comparable con el de la solar térmica antes indicado, pues la solar térmica cubriría tan solo el 35% de la demanda (el resto era de la biomasa) y esta generación fotovoltaica cubriría el 100%. Por tanto, en términos de requerimiento de cubierta para igualdad de cobertura de la demanda la opción con fotovoltaica requeriría ocupar el 44,4% de la superficie de cubierta en el año 2050, es decir, un 171% de lo que

más apropiada para el conjunto del sistema energético. En efecto, en la inmensa mayoría de los casos considerados hasta ahora para alcanzar la condición de ZEB se hace imprescindible integrar generación de acuerdo con energías renovables en el propio edificio⁵⁰⁸ (típicamente fotovoltaica), y contar con una interconexión con la red eléctrica para poder equilibrar en base anual esa generación local con la demanda de energía. En estas condiciones, quien realmente hace que se alcance el ZEB es la interconexión con el sistema eléctrico, y el potencial de interacción positiva entre el edificio y el sistema eléctrico es muy superior si se hace bidireccional⁵⁰⁹ que restringiéndose al enfoque unidireccional del ZEB. En efecto, esa bidireccionalidad, como componente fundamental de la inteligencia, proporciona un potencial superior de alcanzar las condiciones de neutralidad colocando la frontera en el conjunto del sistema energético en lugar de limitarse a colocar las fronteras en torno al propio edificio, y permite que el edificio pase de ser un ente ciego para el sistema al que tan solo le impone sus requerimientos⁵¹⁰, a ser un componente activo en la operación y optimización del conjunto.

En el ámbito del concepto ZEB, una iniciativa que merece mención especial por la cantidad de documentación que está generando a lo largo de estos últimos años, es la iniciativa NZEB⁵¹¹ del Departamento de Energía en EE. UU. (DOE), que apunta a disponer de edificios de consumo neto nulo económicamente viables para el año 2025. Hasta la fecha han publicado estudios de distintas tipologías de edificios comerciales alcanzando reducciones del 30% y el 50% del consumo total de energía final. En la bibliografía recogemos diversas referencias asociadas a este programa y otros estudios de ZEB o VLEB.

En el marco de la UE la Directiva 2010/31/EU establece para los estados miembros el objetivo de que a partir del 31/12/2020 todos los edificios nuevos⁵¹² sean de consumo casi nulo (nZEB⁵¹³). Lamentablemente, la Directiva deja tan abierta la definición⁵¹⁴ de qué se entiende por un nZEB que no es posible cuantificar sus implicaciones y efectos, pudiendo anticipar una gran divergencia entre las aproximaciones adoptadas por los distintos estados miembros⁵¹⁵.

3.7.1.9 Zonificación climática

En la actualidad, el desempeño energético de un edificio se ve considerablemente afectado por el emplazamiento climático en el que se encuentra localizado. Esto va siendo menos cierto a medida que se van incorporando elementos de eficiencia energética apropiados y adaptados en su nivel de exigencia, para el emplazamiento climático del edificio, de tal forma que tal y como veremos, en el contexto E3.0 la dependencia climática del desempeño energético del edificio dentro de la España peninsular es muy inferior a la actual.

Puesto que en el desarrollo de los escenarios vamos a referenciar las zonas climáticas en las que puede encontrarse el edificio, y dado que el nivel de resolución espacial que vamos a emplear es el provincial, en las figuras 226 y 227 recogemos dos zonificaciones climáticas a las que recurriremos de las provincias de la España peninsular.

Una de ellas es la zonificación climática que introduce el CTE⁵¹⁶, y en la que se basan todas las exigencias de la regulación actual en lo que se refiere a la envolvente y los sistemas energéticos de un edificio. Esta zonificación climática se basa en las denominadas severidades climáticas de invierno y verano, que se

requería la solar térmica. La conclusión que podemos extraer de estos resultados es que resulta imprescindible desplegar el potencial de las medidas de eficiencia para proceder a cubrir el remanente de demanda haciendo uso de una cantidad viable y razonable de generación de origen renovable.

496 Sin embargo, como veremos a lo largo de este informe, la cobertura de una demanda BAU sin desplegar el potencial de las medidas de eficiencia, si bien es posible en relación a la cantidad de recurso de generación renovable, pero requeriría el despliegue de una infraestructura de generación y transporte de energía muy superior a la que actualmente tenemos, con sus impactos tanto ambientales como económicos asociados. Y además, tal y como mostrábamos en la introducción de este informe el modelo energético resultante sería insostenible por acabar agotando con el paso del tiempo el total de nuestro recurso de generación renovable.

497 Y económicamente más favorable que un escenario que sería anclado en combustibles fósiles.

498 La regulación centralizada tradicional, donde la demanda es ciega a los requerimientos del sistema y toda la regulación se realiza desde unos pocos centros de generación, pasa a ser simplemente inviable en un contexto de gran integración de generación renovable distribuida por la red.

499 VLEB: Very Low Energy Building.

500 Originado por un profesor sueco y otro alemán, con la primera casa construida según este estándar en 1990.

501 Las exigencias de este estándar se materializan en una demanda máxima de calefacción de 15 kWh/m²-a y un consumo máximo de energía primaria de 120 kWh/m²-a.

502 Principalmente en Alemania y Austria, pero también se ha extendido a Escandinavia y los EE. UU., buscando adaptaciones a climas con mayor severidad de verano como los que tenemos en España.

503 Si bien la versión final de la nueva directiva de eficiencia energética en los edificios (Directiva 2010/31/UE) se ha desvinculado del estándar Passiv Haus y ha introducido el requerimiento de que en el año 2020, todos los edificios nuevos sean de consumo casi nulo (aunque lamentablemente sin concretar que quiere decir

evalúan basándose en los grados-día⁵¹⁷ y la irradiación solar incidente en los regímenes de calefacción y refrigeración. En esta zonificación climática, España queda dividida en 12 zonas climáticas.

La otra zonificación climática que vamos a emplear es la definida por ASHRAE⁵¹⁸, y en la

que se basan los estándares de energía en EE. UU. Esta zonificación está basada en los grados-día⁵¹⁹ de invierno y verano, y en la precipitación anual. Según esta zonificación climática, la España peninsular queda dividida en 6 zonas climáticas.

Figura 226. Zonas climáticas del CTE para las capitales de provincia de la España peninsular.

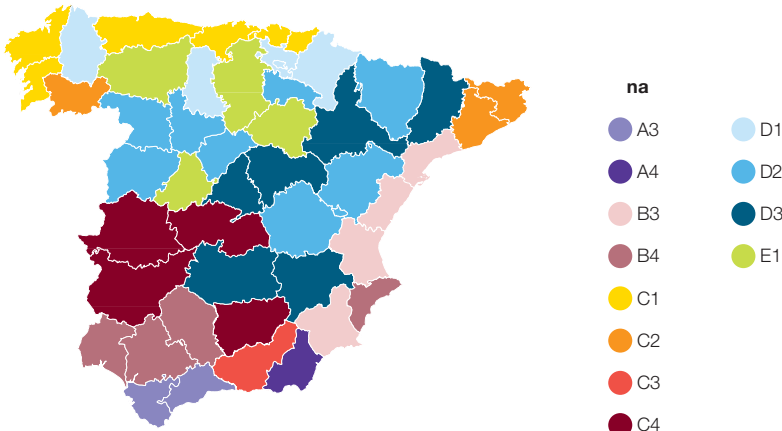
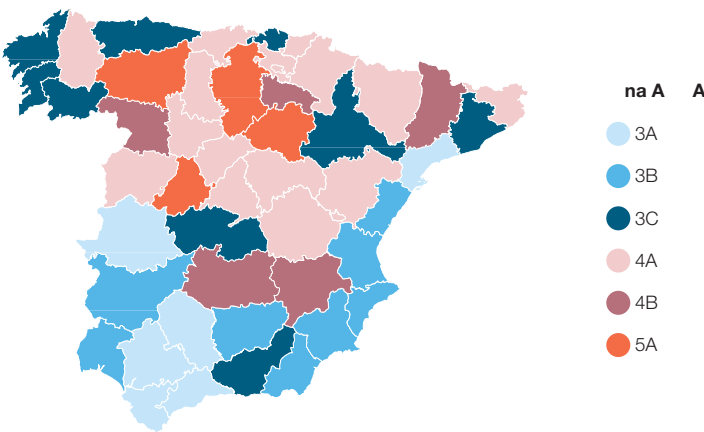


Figura 227. Zonas climáticas de ASHRAE para las capitales de provincia de la España peninsular.



ese "casi" y dejándolo abierto a la interpretación de los estados miembros).

504 ZEB: Zero Energy Buildings.

505 (Ole Michael Jensen, Kim B. Wittchen, Kirsten Engelund Thomsen, 2009).

506 (Paul Torcellini, Shanti Pless, and Michael Deru, Drury Crawley, 2006).

507 En base anual o en cada instante de tiempo según sea la definición adoptada.

508 Y no precisamente en cantidades pequeñas. Por ejemplo, el programa Building America que apunta a conseguir edificios residenciales ZEB para 2020, lo hace con una contribución fotovoltaica entre el 30% y el 40% del consumo final de energía del edificio. En el caso de edificios terciarios con gran cantidad de carga de proceso, el alcanzar el ZEB puede requerir integrar cantidades considerablemente superiores de fotovoltaica.

509 Es decir, que no solo el sistema eléctrico absorbe la generación local del edificio para permitirle alcanzar su objetivo ZEB, sino que el edificio responde a las necesidades del sistema eléctrico para integrar la generación renovable disponible en otras partes del sistema.

510 Requerimientos que por lo general implican un sobredimensionado del sistema energético más allá del edificio para gestionar esa demanda y generación ciegas a las necesidades del sistema global.

511 NZEB: Net Zero Energy Buildings.

512 Para los edificios nuevos ocupados por la administración pública y propiedad de la administración pública, esta fecha se adelanta al 31/12/2018.

513 nZEB: nearly Zero-Energy Buildings.

514 En efecto, tanto el nivel de eficiencia del edificio (y por tanto su demanda), como las fuentes energéticas empleadas para cubrirla (que pueden ser renovables locales, renovables no locales o incluso otra fuente energética), e incluso los componentes de la demanda energética del edificio a considerar (en concreto los equipamientos es fácil que se escapen de los alcances adoptados por los estados miembros, y tal y como veremos más adelante esta componente de la demanda es precisamente la que pasa a ser dominante en un contexto eficiente), quedan demasiado abiertos.

515 Esta situación es especialmente lamentable porque esta Directiva ha surgido como una

3.7.1.10 Tipologías de edificios

El desarrollo de los escenarios de consumo del sector edificación se basa en la simulación de unos cuantos edificios representativos del parque de edificios en los distintos emplazamientos climáticos, del tal forma que, junto a los escenarios de la superficie construida de las distintas tipologías de edificios, nos permita evaluar la demanda agregada del sector.

Con la finalidad de poder cuantificar los efectos que cabe esperar de la introducción de distintas medidas de eficiencia, y por tanto de orientar a objetivos las estrategias de apoyo a dichas medidas, así como la regulación energética, resulta imprescindible disponer de una serie de edificios de referencia que representen correctamente al parque de edificios existente. En España no se han desarrollado estos edificios de referencia. Pero en EE. UU. sí que se han desarrollado por parte de la administración, y se mantienen regularmente, una serie de modelos de edificios de referencia⁵²⁰ pensados para representar el parque de edificios existente en ese país. Estos edificios de referencia, que en adelante referiremos como los DOE Benchmarks, están constituidos por 16 tipos⁵²¹ de edificios comerciales, entre los que se incluye un bloque de viviendas, extraídos de un programa de muestreo del parque de edificios y sus principales indicadores energéticos regularmente actualizado por la administración de EE. UU., y están implementados en formato de la herramienta de simulación que emplearemos en este informe (Energy Plus). El objetivo del DOE al facilitar estos modelos de edificios de referencia es incentivar la investigación sobre medidas de eficiencia con una base común que permita la comparación entre distintos estudios.

Dado que los DOE Benchmarks son los edificios de referencia más bien definidos que

hemos encontrado, y dada la ausencia tanto de unos edificios de referencia representativos del parque de edificios en España, como de una caracterización completa del parque de edificios existentes en nuestro país que nos permitiera establecer las tipologías más representativas de nuestro parque de edificios, para la elaboración de este estudio hemos elegido de entre los DOE Benchmarks aquellos que consideramos más representativos⁵²², completándolos con un edificio de referencia representativo de los edificios residenciales distintos del bloque de pisos que hemos desarrollado en el marco de este informe.

Algunas de las tipologías de los DOE Benchmarks pueden resultar a primera vista poco representativas de las tipologías constructivas en España. Sin embargo, por un lado debemos evitar los juicios “a primera vista”, y es necesaria una correcta caracterización estadística del parque de edificios para poder definir lo que constituye una tipología representativa. Por otro lado, por lo que respecta al instante inicial del periodo considerado para el desarrollo de los escenarios procederemos a un calibrado de los resultados proporcionados por el modelo global del sector edificación para manejar esta y otras incertidumbres, y por lo que respecta al instante final del periodo analizado (año 2050), y especialmente para el contexto E3.0, algunas de las tipologías de edificios que a priori pueden parecer menos representativas del parque Español (como los restaurantes) pasan a estar dominadas por la energía de proceso, independizando en buena medida su desempeño energético de la geometría del edificio.

Por otro lado merece la pena comentar el hecho de que al adoptar unas tipologías fijas de los edificios limitamos el alcance de las medidas de eficiencia relacionadas con la forma del edificio⁵²³. Esto, por un lado,

refundición de la Directiva 2002/91/EC sobre el desempeño energético de los edificios (EPBD: Energy Performance Buildings Directive), por la evidente necesidad de endurecer y concretar sus planteamientos de cara a que la repercusión de su transposición en los estados miembros tuviera un efecto significativo en todos los estados miembros. La indefinición a estas alturas conduce a mayores retrasos en el despegue de una edificación de alta eficiencia.

Aspectos positivos de esta Directiva los constituyen el requerimiento de que los estados miembros elaboren planes nacionales para incrementar el número de nZEB, en los que debe figurar la definición adoptada por cada estado miembro para el concepto nZEB (y el correspondiente indicador de prestaciones energéticas en términos de kWh/m²·a de energía primaria que define el nZEB) y la publicación por parte de la CE a partir de 2012 de un informe trianual reflejando los avances de cada estado en el despliegue de los nZEB. También se establece en esta Directiva que los niveles mínimos de prestaciones energéticas de los edificios deberán establecerlos los estados miembros con el objetivo de alcanzar niveles óptimos de rentabilidad, y deben contrastarse los resultados establecidos por los estados miembros con un marco metodológico comparativo, para calcular los niveles óptimos de rentabilidad que establecerá la comisión en el año 2011, de tal forma que los estados miembros deban justificar ante la comisión discrepancias importantes (por encima del 15%) entre los requerimientos impuestos en la normativa y los valores óptimos de exigencia sobre las prestaciones de los edificios.

516 CTE: Código Técnico de la Edificación.

517 Los grados-día de un emplazamiento constituyen una medida de la divergencia acumulada de la temperatura ambiente de un emplazamiento respecto a una determinada temperatura de referencia. Si la temperatura de referencia empleada coincide con la temperatura de equilibrio del edificio considerado con su entorno (aquella para la cual las ganancias internas compensan las pérdidas por transmisión), entonces los grados-día, al multiplicarlos por la conductancia térmica de la envolvente del edificio, proporcionan directamente una

constituye un planteamiento conservador en relación al potencial de mejora, y por otro lado responde al alcance del estudio planteado, que pretende representar el conjunto

del sector edificación, y resulta muy distinto de la situación en la que se plantea optimizar un edificio concreto sometido a sus restricciones contextuales.

Figura 228. Edificio de referencia de oficinas. Corresponde al oficina media del DOE Benchmark. Área climatizada = 4.982 m².

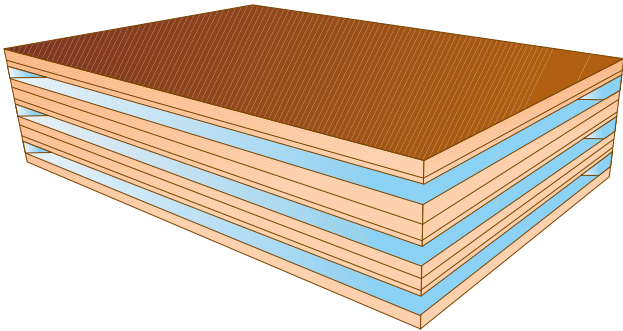


Figura 229. Edificio de referencia de almacén. Procede de DOE Benchmark. Área climatizada = 4.835 m².

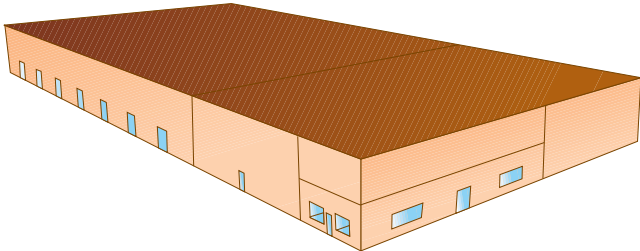
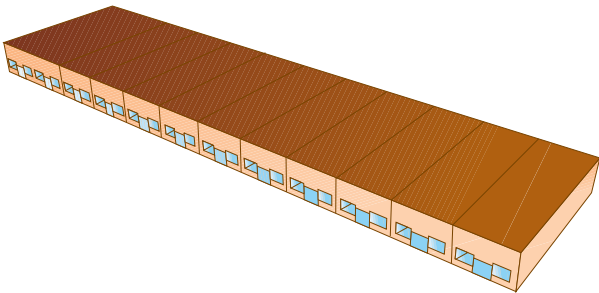


Figura 230. Edificio de referencia de comercio. Corresponde al centro comercial (strip mall) de DOE Benchmark. Área climatizada = 2.090 m².



estimación de la demanda energética (carga térmica) asociada al exceso de las pérdidas por transmisión que no se equilibra con las ganancias internas. Por este motivo, los grados-día constituyen una variable climatológica muy empleada para la caracterización climática de un emplazamiento desde el punto de vista de la demanda energética para climatización de los edificios en él situados. Se definen dos tipos de grados-día, los de régimen de calefacción y los de régimen de refrigeración, para caracterizar las demandas energéticas tanto en régimen de calefacción como de refrigeración.

- 518 ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- 519 Sin embargo, las temperaturas de referencia de los grados-día empleados por el CTE y por ASHRAE son distintas.
- 520 Deru, M.; Field, K.; Studer, D.; Benne, K.; Griffith, B.; Torcellini, P.; Halverson, M.; Winiarski, D.; Liu, B.; Rosenberg, M.; Huang, J.; Yazdani, M.; Crawley, D. (2009).
- 521 Edificio de oficinas grande, edificio de oficinas mediano, edificio de oficinas pequeño, almacén, comercio aislado, centro comercial, escuela primaria, escuela secundaria, supermercado, restaurante de comida rápida, restaurante, hospital, hospital de día, hotel pequeño, hotel grande, y bloque de viviendas.
- 522 Evidentemente lo ideal sería poder contar con una serie de modelos que se adapten mejor a las tipologías constructivas representativas del parque de edificios en España, lo cual implica en primer lugar proceder a una correcta caracterización estadística del parque. Estos modelos podrían entonces emplearse tanto para orientar la regulación energética del sector a objetivos, como para explorar en una base comparativa común las distintas medidas de eficiencia a implementar. Actualmente no disponemos de esta información en España, y escapa totalmente al alcance de este estudio el elaborarla, por tanto consideramos que su elaboración y mantenimiento es una tarea que le corresponde a la administración.
- 523 La forma del edificio, tanto por lo que respecta a su compactidad y a su distribución geométrica, es una importante variable de diseño para optimizar su comportamiento energético al maximizar los aspectos positivos de su interacción con el clima local y minimizar los aspectos negativos.

En las figuras 228 a 236 recogemos las geometrías⁵²⁴ de los edificios de referencia empleados para facilitar la interpretación de los resultados presentados. Para los correspondientes edificios E3.0 pueden aparecer ligeras modificaciones como la variación de las áreas acristaladas.

Mención aparte merece el edificio de referencia para los edificios residenciales, pues no forma parte del DOE Benchmarks y lo hemos desarrollado para proporcionar una primera

aproximación del resto del parque de edificios residenciales que no constituyen un bloque de pisos. Dado que el área de edificios residenciales domina⁵²⁵ el total del área del parque edificatorio, no nos ha parecido adecuado describir el conjunto del parque residencial con un único edificio de referencia.

Los edificios residenciales son los únicos para los cuales se dispone en España de una caracterización parcial a través de los censos del INE.

Figura 231. Edificio de referencia de educación. Corresponde a la escuela primaria de DOE Benchmark. Área climatizada = 6.871 m².

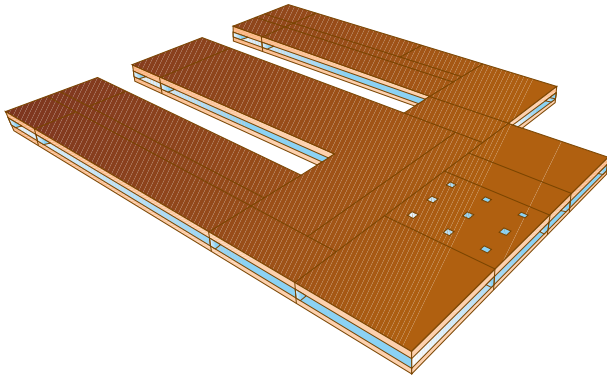
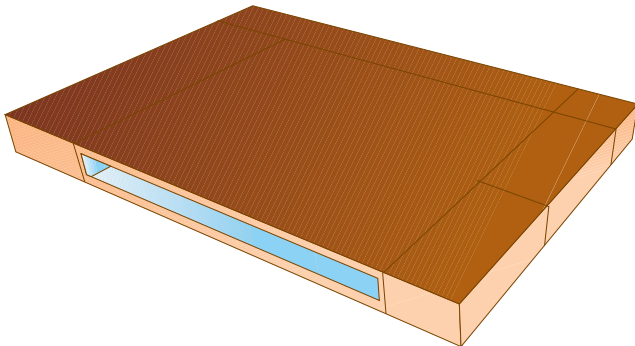


Figura 232. Edificio de referencia de supermercado. Corresponde al DOE Benchmark. Área climatizada = 4.181 m².



524 Las geometrías mostradas se corresponden a los edificios BAU, en el caso de los E3.0 aparecen algunas modificaciones como las asociadas a la incorporación de lucernarios para aprovechamiento de la iluminación natural en las plantas superiores. Estos lucernarios adicionales para el contexto E3.0 no introducen riesgos de incrementar la contaminación lumínica nocturna, pues por un lado se limitan a porcentajes pequeños de la superficie de cubierta (típicamente por debajo del 5%), y por otro lado van dotados de elementos inteligentes para aumentar su capacidad aislante durante las noches, de tal forma que en periodos nocturnos quedan cubiertos por una capa aislante que los convierte en opacos. Además, dada la limitación de los lucernarios para aportar iluminación natural tan solo a las plantas superiores, en el contexto E3.0 se despliegan también otros elementos de iluminación natural como los tubos de luz y la fibra óptica con capacidad de acceder a las zonas interiores del edificio.

525 Aunque como veremos más adelante, en términos energéticos su importancia se reduce dado el mayor consumo específico de otras tipologías de edificios.

Figura 233. Edificio de referencia de restaurante. Corresponde al DOE Benchmark. Área climatizada = 511 m².

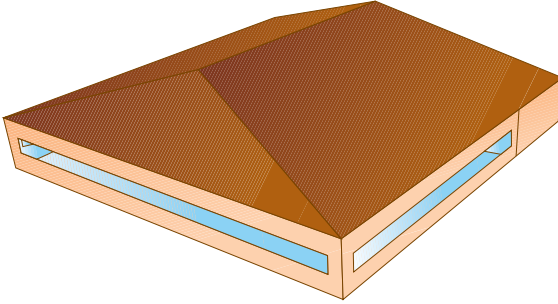


Figura 234. Edificio de referencia de hospital. Corresponde al DOE Benchmark. Área climatizada = 22.422 m². Los huecos que se observan son una consecuencia gráfica del uso de multiplicadores en el modelo energético, pero realmente están ocupados por estancias como las que se encuentran en los límites de los huecos.

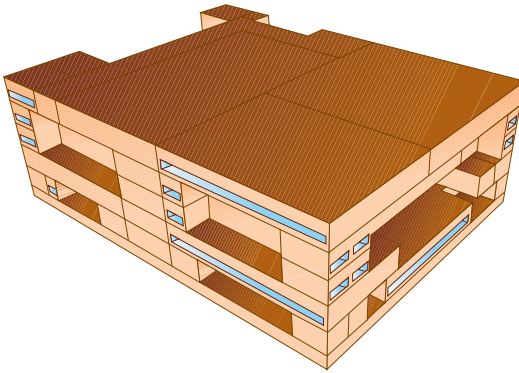


Figura 235. Edificio de referencia de hotel. Corresponde al DOE Benchmark. Área climatizada = 4.014 m².

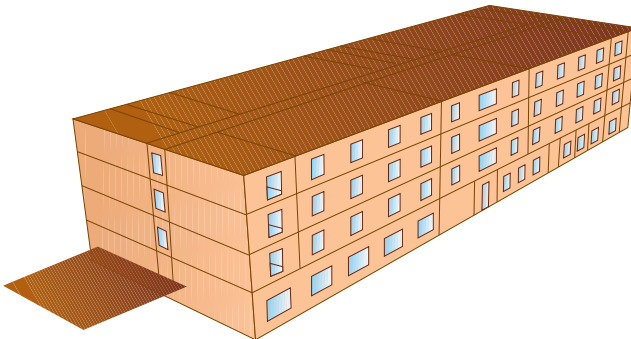
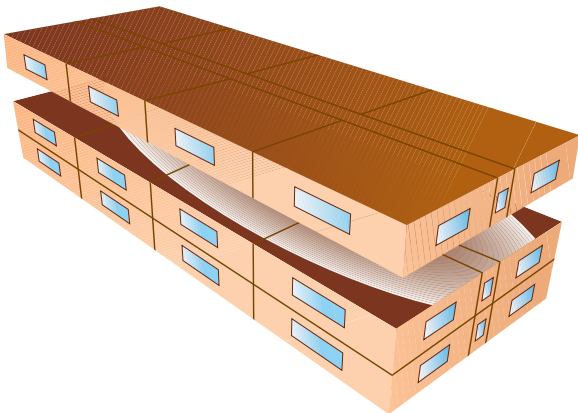


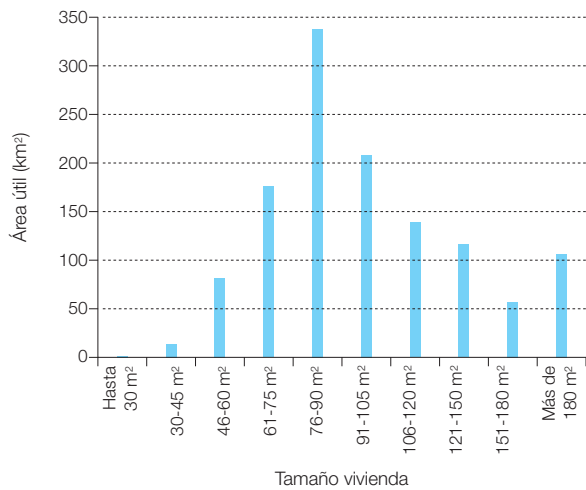
Figura 236. Edificio de referencia de residencial⁵²⁶: bloque de pisos. Corresponde al DOE Benchmark. Área climatizada = 3.135 m².



Las figuras 237 y 238 nos muestran la distribución de la superficie de viviendas según tamaño de la vivienda⁵²⁷ y según el número de plantas sobre rasante. Según esto elegimos viviendas de 84 m² distribuidas en dos plantas para elaborar el edificio de referencia. Por último, la figura 239 nos muestra el reparto

modal de la edificación residencial construida en el periodo 2000-2009, basándose en la cual elegimos una vivienda adosada para representar el parque residencial distinto de las viviendas en bloque. La figura 240 recoge la geometría del edificio de referencia seleccionado.

Figura 237. Distribución de la superficie del parque de viviendas según tamaño de las viviendas (datos INE, 2004).



⁵²⁶ Corresponde a un edificio de cuatro pisos, de los cuales solo se muestran tres porque el segundo y tercero son térmicamente equivalentes.
⁵²⁷ Censos de Población y vivienda 2001, INE.

Figura 238. Distribución de la superficie del parque de viviendas según el número de plantas sobre rasante (datos INE, 2004).

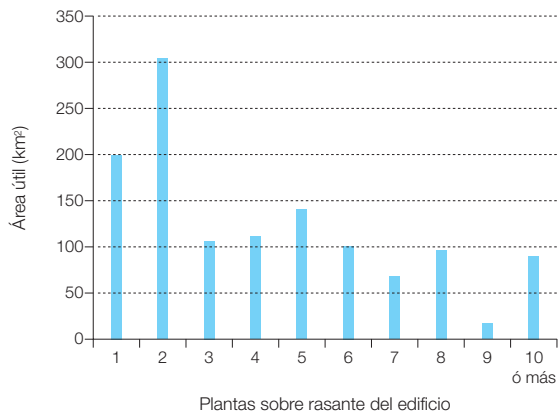


Figura 239. Distribución modal del área de edificios residenciales acumulada en el periodo 2000-2009 (datos Ministerio de Fomento, “boletín estadístico: Boletín_61_2”).

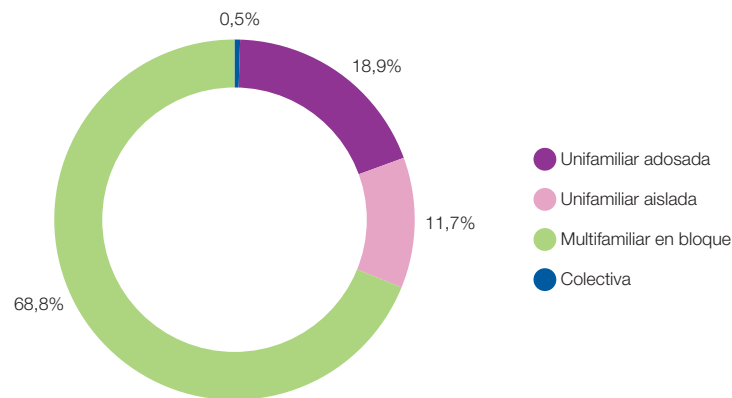
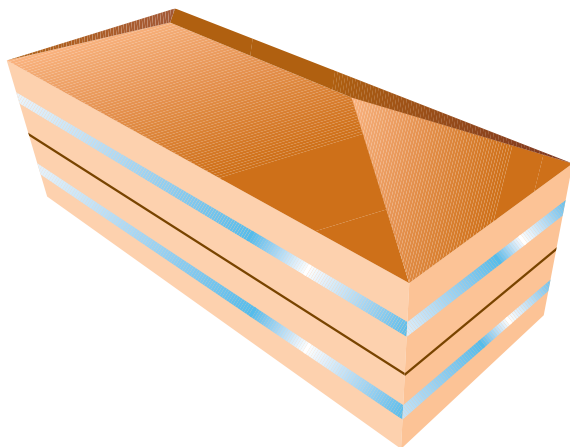


Figura 240. Edificio de referencia residencial (no bloque de pisos), representativo de tres viviendas adosadas de 84 m² cada una. Área acondicionada = 252 m².



3.7.1.11 Consumo energético de referencia de los edificios

El punto de partida para la elaboración de escenarios de consumo energético del sector edificación debería ser la correcta caracterización de la estructura del parque de edificios actual en términos energéticos.

Lamentablemente, en España carecemos de una caracterización de la estructura del sector edificación, tanto por lo que se refiere a su reparto modal, como por lo que se refiere a sus indicadores de consumo energético específico. En otros países sí que se dispone de esta información⁵²⁸, por lo que las medidas de promoción de la eficiencia pueden ser orientadas a objetivos, y lo que es más importante, su eficacia puede ser verificada a posteriori.

El único dato de partida que proporciona cierta información sobre el consumo del sector edificación es el consumo agregado del sector que se puede deducir de estadísticas globales como las presentadas por el AIE, y

que para el año 2007⁵²⁹ proporcionan en términos de energía primaria 299 TWh/a para los edificios residenciales y 230 TWh/a para los edificios terciarios⁵³⁰. Sin embargo, un dato tan agregado como este, obtenido probablemente de medidas indirectas, constituye una caracterización muy débil del sector, dejando muchos interrogantes abiertos tal y como mostraremos en el apartado dedicado al calibrado del consumo energético actual del sector edificación.

Otra información con la que contamos desde la aparición del RD 47/2007 sobre la certificación energética de edificios nuevos en España, son los niveles de referencia de consumo de energía empleados para configurar la escala de calificación energética. Sin embargo, hay tres inconvenientes asociados al uso de estos niveles de referencia:

- Solo hacen referencia a la energía regulada, es decir, a aquellos componentes de consumo que están regulados por la legislación actual. En el caso de los edificios

⁵²⁸ Por ejemplo en EE. UU., la EIA (US Energy Information Administration), actualiza cada cuatro años el CBECS (Commercial Buildings Energy Consumption Survey: commercial energy uses and costs). Según esta encuesta y los Benchmarks (edificios de referencia) desarrollados por el DOE y calibrados con los resultados de la CBECS, en los últimos años el DOE (departamento de energía de EE. UU.) ha lanzado la Net Zero Energy Buildings Initiative con el objetivo de producir edificios de consumo neto cero y económicamente viables para el año 2020 en el sector residencial, y para el año 2025 en el sector terciario. Con este fin, en los últimos años el DOE ha producido diversos estudios con medidas orientadas a los objetivos concretos de reducir un 30% o un 50% el consumo de energía en distintas tipologías de edificios respecto al estándar de construcción actual.

⁵²⁹ Último año disponible en la web de la AIE para las fechas de redacción de este informe (septiembre 2010).

⁵³⁰ Sin embargo, este dato también contiene una incertidumbre significativa, como pone de manifiesto la discrepancia entre los valores proporcionados por Eurostat y los de la AIE, que en principio deberían proceder ambos de la administración Española.

residenciales, esto se deja fuera entre otros a los consumos para iluminación y para equipamiento. Desafortunadamente, estos dos componentes, y especialmente el de equipamiento, son los que van a dominar la demanda energética de los edificios en el futuro, y especialmente en el contexto E3.0, por lo que la ausencia de caracterización y regulación de las mismas significa una seria barrera a la realización de los niveles de eficiencia que serían deseables.

- En el sector de los edificios terciarios, el indicador seleccionado para la calificación energética no es un indicador absoluto sino uno relativo⁵³¹, por lo que los límites de la escala de calificación no proporcionan ningún valor de referencia del consumo energético de los edificios y por tanto no nos aportan información adicional alguna.
- En el caso de los edificios destinados a vivienda⁵³², la escala de calificación sí que está basada en un indicador absoluto, por lo que nos proporciona niveles de referencia del consumo energético de los edificios (aunque solo de su componente regulada). Sin embargo, estos niveles de referencia no están asociados a las características del parque de edificios actual, sino a lo que deberían ser los edificios nuevos construidos cumpliendo el CTE⁵³³, y por tanto en todo caso serían representativos de los edificios nuevos cuyo proyecto fuera visado con posterioridad al 9/2006⁵³⁴. Por tanto, su utilidad para caracterizar la situación energética del parque de edificios actual⁵³⁵ es muy limitada.

Dadas estas limitaciones en la caracterización del parque de edificios en España y en la caracterización de los niveles de eficiencia que cabe esperar del mismo, de cara al futuro, además de la información que extraeremos

de la estructura de la calificación energética en edificios de vivienda, nos hemos apoyado también en los edificios de referencia de EE. UU. (DOE Benchmarks) para elaborar los escenarios del sector edificación.

En este punto vamos a presentar las conclusiones que se desprenden del procesado de la información disponible sobre la caracterización energética del parque de edificios, dejando su calibrado con los valores macro proporcionados por los balances de la AIE para más adelante, cuando ya hayamos introducido las hipótesis sobre el reparto modal de los edificios.

La principal conclusión de este análisis, desde la perspectiva de la elaboración de escenarios BAU y E3.0, es que los edificios de referencia actuales en EE. UU. pueden constituir una buena representación del escenario BAU en 2050 para España para el conjunto del parque de edificios.

3.7.1.12 Certificación energética en España

En este punto vamos a recopilar la información útil que se desprende de la calificación energética de edificios residenciales nuevos con vistas a la elaboración de los escenarios del sector edificación.

El primer punto a tener presente es que el CTE⁵³⁶ no es una regulación orientada a objetivos energéticos⁵³⁷. Una consecuencia directa de este hecho es que al establecer una calificación energética orientada a objetivos⁵³⁸, los edificios que rigurosamente cumplen con el CTE se distribuyen a través de toda la escala de calificación⁵³⁹. Por tanto, incluso si los edificios nuevos cumplieran el CTE a rajatabla, esto no nos proporcionaría

531 En efecto, para los edificios terciarios la escala de calificación energética se construye según un edificio de referencia que cambia proyecto a proyecto, pues se define como un edificio geoméricamente análogo al edificio que se va a certificar. Esta escala relativa es la que está en el origen de incongruencias como la de que un edificio de mayor consumo pueda tener una calificación mejor que otro de menor consumo (García-Casals, X., 2008-1). El problema se agrava todavía más por el hecho de que errores en la herramienta de calificación (CALENER) conducen a empeorar ficticiamente de forma exagerada las prestaciones del edificio de referencia, haciendo aparecer al edificio propuesto como relativamente muy bueno aunque su desempeño energético diste mucho de esta situación, y confiriéndole en consecuencia una calificación muy elevada que no merece. Por tanto, ni tan solo de los edificios de referencia para el sector terciario se puede extraer de la calificación energética información relevante en relación al nivel de consumo de energía de estos edificios para las distintas categorías de calificación.

532 En el documento reconocido "Escala de Calificación Energética. Edificios de nueva construcción. IDAE. Mayo 2009" puede encontrarse el desarrollo de las escalas de calificación de los edificios nuevos.

533 CTE: Código Técnico de la Edificación. Fin del periodo transitorio para su aplicación: 29/9/2006.

534 Suponiendo que estos edificios realmente cumplan los requerimientos del CTE en su ejecución real y más allá del papel (proyecto).

535 Esperemos que para cuando salga el procedimiento de calificación energética de los edificios existentes (que en principio tenía que haber salido a lo largo de 2010 pero que todavía no está disponible en las fechas de redacción de este informe: 10/2010), se proporcione una caracterización energética del parque de edificios actual que permita empezar a cubrir este déficit.

536 CTE: Código Técnico de la Edificación.

537 En efecto, las restricciones energéticas del CTE no establecen límites a la demanda energética de un edificio en términos de un indicador absoluto, como podría ser el consumo por unidad de superficie (kWh/m²).

información alguna sobre el nivel de consumo de energía de esos edificios.

La distribución oficialmente estimada⁵⁴⁰ de los edificios residenciales nuevos en la escala de calificación es la que reproducimos en la figura 241, donde se aprecia que la mayoría de edificios se encuentran en la clase D⁵⁴¹. El percentil⁵⁴² 40% de los edificios nuevos⁵⁴³, cumpliendo el CTE, es el que se empleó para definir el límite entre las calificaciones C y D.

Otro dato interesante para nuestros fines es que la degradación⁵⁴⁴ en energía primaria regulada al pasar de la frontera entre las calificaciones C-D (percentil 40% de muestra analizada) a la frontera entre las calificaciones D-E (percentil 95%) oscila entre 140%-149% en todas las capitales de provincia⁵⁴⁵.

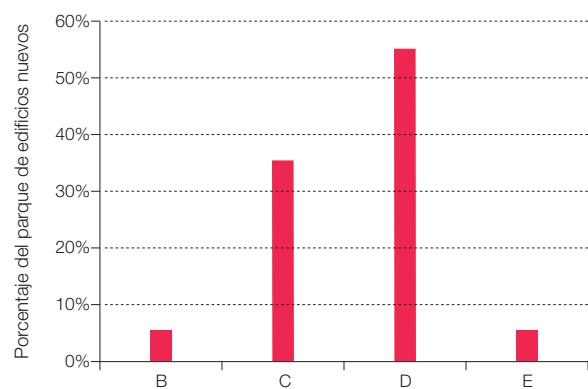
Los edificios construidos según la normativa anterior⁵⁴⁶ al CTE no son necesariamente peores⁵⁴⁷ a los del CTE⁵⁴⁸, especialmente en viviendas unifamiliares o edificios de baja compacidad (García-Casals, X., 2004, 2005, 2006-1).

Pero a priori hay motivos para presuponer que las prestaciones del parque actual son peores, tanto las del CTE como que las de la NBE-CT79:

- Antigüedad del parque.
- Discrepancia de los planos y justificaciones de cumplimiento de la normativa frente a lo realmente ejecutado en obra, y cómo se haya degradado a lo largo del tiempo.

En este contexto, como primera aproximación⁵⁴⁹ para establecer niveles de referencia del consumo energético del parque de edificios actual, supondremos que el nivel del consumo del parque de edificios actual⁵⁵⁰ viene caracterizado por una degradación del 135% respecto al límite D-E de la escala de calificación de edificios residenciales nuevos. Además, dada la situación actual, una primera aproximación del BAU 2050 podría ser que de media, el conjunto del parque de edificios se encontrará en el valor medio del intervalo asignado a la calificación C actual.

Figura 241. Estimación oficial de la distribución del parque de edificios residenciales nuevos (cumpliendo el CTE) por la escala de calificación.



a). Por el contrario se limitan a establecer límites de prestaciones en la mayoría de los elementos que generan la demanda energética del edificio (como los coeficientes de transferencia a través de su envolvente).

538 Es decir, basada en indicadores absolutos como es el caso de los edificios residenciales (no así de los terciarios).

539 Es decir, dados dos edificios que estrictamente cumplan el CTE, uno de ellos puede proporcionar un nivel de consumo energético correspondiente a la clase-B, mientras el otro puede ser de la clase-E. Este hecho queda ilustrado en el propio informe "Escala de Calificación Energética. Edificios de nueva construcción. IDAE. Mayo 2009".

540 Esta estimación se corresponde con la simulación de unos cuantos edificios tipo que estrictamente cumplan el CTE, y es la que sirvió de base para confeccionar la escala de calificación de edificios residenciales. En "Escala de Calificación Energética. Edificios de nueva construcción. IDAE. Mayo 2009" puede encontrarse más información al respecto.

541 Realmente no hay ningún elemento que garantice que no puedan existir edificios nuevos cumpliendo el CTE incluso en las calificaciones más extremas (A o F).

542 El percentil 40% quiere decir el punto correspondiente al 40% de la superficie útil del parque de edificios en la distribución de frecuencia acumulada de demanda energética (o de emisiones). Es decir, que el 40% de la superficie útil del parque de edificios presenta una demanda inferior o igual a la correspondiente al percentil 40%.

543 Según las tipologías empleadas para elaborar la escala.

544 Definiremos la degradación o coeficiente de degradación, al valor relativo del consumo de energía primaria en relación a un valor de referencia. Por tanto, en este caso, una degradación del 140% significa que el consumo de energía primaria de la frontera entre las calificaciones D-E es el 140% del correspondiente a la frontera entre las calificaciones C-D. En principio le denominamos coeficiente de degradación porque es de esperar un mayor consumo que en la referencia adoptada, pero podemos encontrarlos con coeficientes de degradación menores que la unidad, en cuyo caso significa que el comportamiento

Tabla 1. Hipótesis sobre los niveles de consumo de las componentes de energía no reguladas, tanto para el parque actual como para el BAU 2050 de los edificios residenciales.

kWh/m ² -a energía final	Parque actual	BAU 2050
Iluminación	14,5	9,7
Electrodomésticos	30	45
Cocina	18	18
Total	62,5	73,0

Por otro lado, tal y como hemos comentado, la regulación y certificación de edificios residenciales nuevos en España solo abarca algunas de las componentes de la demanda energética de los edificios (climatización⁵⁵¹ y ACS), dejándose fuera componentes como pueden ser la iluminación y los equipamientos. Pero lo que a nosotros nos interesa para caracterizar energéticamente al sector es el conjunto de su demanda energética. Por este motivo, hemos añadido unas hipótesis para caracterizar la demanda de energía no regulada de los edificios residenciales, tanto en la situación actual como en el BAU 2050. Teniendo en cuenta la ausencia de regulación sobre estas componentes energéticas, realmente es excesivamente optimista el presuponer que el BAU 2050 experimentará una mejora significativa respecto a la situación actual. De hecho, por lo que concierne a los equipamientos, la tendencia que cabe esperar es a un crecimiento de la potencia instalada, pues a pesar de las mejoras en eficiencia de los equipos individuales, su cantidad cabe esperar que se incremente a medida que pase el tiempo, siguiendo la actual tendencia en introducción de equipamientos en los hogares⁵⁵². En la tabla 1 recogemos los valores que hemos usado en términos de energía final⁵⁵³ para elaborar los resultados de este apartado.

Según estas suposiciones, presentamos a continuación los resultados asociados al procesado de la información correspondiente a la escala de calificación de edificios residenciales nuevos, proporcionando una primera aproximación tanto de la caracterización actual del parque de edificios residenciales, como del BAU 2050 para estos edificios.

Como una primera referencia de eficiencia energética, en los resultados aquí presentados añadiremos los niveles de consumo asociados al estándar Passiv Haus⁵⁵⁴, no porque sea un estándar objetivo para el año 2050, sino por ser un estándar que ya han adoptado algunos países⁵⁵⁵, y que en la propia UE se llegó a proponer para su adopción a partir de 2015⁵⁵⁶.

3.7.1.12.1 *Demanda energética de referencia: Edificios residenciales*

En primer lugar presentamos la demanda energética asociada a los denominados valores de referencia de la calificación energética, que corresponden al percentil 50%⁵⁵⁷ de los valores de la “muestra” empleada para desarrollar la escala de calificación⁵⁵⁸, y por tanto deberían ser representativos del promedio de los edificios construidos cumpliendo la regulación actual (CTE). En las figuras 242 a 246 encontramos los resultados

energético de los edificios considerados es mejor que el de la referencia adoptada.

545 El hecho de que este cociente difiera en las distintas capitales de provincia es debido a que la escala de calificación se modifica para cada una de las 12 zonas climáticas en que el CTE divide España.

546 NBE CT-79.

547 Este hecho es una consecuencia de que se modificara el indicador al pasar de la regulación anterior (NBE CT-79), que empleaba un coeficiente global de transferencia de todo el edificio cuyo límite estaba asociado a la compacidad del edificio, a la actual (CTE), que se basa en los coeficientes de transferencia de cada uno de los componentes del edificio independientemente de la compacidad del edificio, de tal forma que no se puede comprobar directamente si se ha incrementado el grado de exigencia. Al traducir los indicadores del actual CTE al indicador de la anterior NBE CT-79 es cuando se pueden comparar ambas regulaciones, pudiendo observar cómo la nueva regulación (CTE) resulta menos exigente que la anterior para los edificios de baja compacidad (los menos eficientes), proporcionando una ligera mejora para los edificios de elevada compacidad. (García-Casals X., 2004), (García-Casals X., 2005), (García-Casals X., 2006-1).

548 Suponiendo que ambos cumplan estrictamente los requerimientos de la normativa, que ya es mucho suponer...

549 Más adelante, en el apartado dedicado al calibrado del parque de edificios con indicadores macro de la AIE, retomaremos este punto.

550 Es importante apuntar aquí las grandes diferencias en el nivel de consumo del parque de edificios a las que puede conducir la internalización o no de la demanda de condiciones de confort. Así, por ejemplo, en el Reino Unido se ha constatado que las condiciones de confort de los ocupantes de los edificios presentan un importante nivel de adaptación con parámetros socioeconómicos, de tal forma que las temperaturas interiores medias en los edificios residenciales se sitúan en torno a los 15,5 °C en lugar de los 21 °C presupuestos, con lo que el consumo real de los edificios será sensiblemente inferior al que tendrían si mantuvieran una consigna interior de temperatura de 21 °C. En nuestro análisis vamos a presuponer que las condiciones de confort

correspondientes a las viviendas unifamiliares, mientras que en las figuras 247 a 251 encontramos los resultados asociados a las viviendas en bloque, todo ello para las distintas capitales de provincia de la España peninsular.

Por lo que respecta a las emisiones de CO₂, los valores presentados son los correspondientes al esquema de calificación energética, y por tanto hay que interpretarlos como los que se permiten⁵⁵⁹ para la categoría de edificio considerada.

Figura 242. Consumo medio de energía primaria regulada en viviendas unifamiliares cumpliendo CTE.

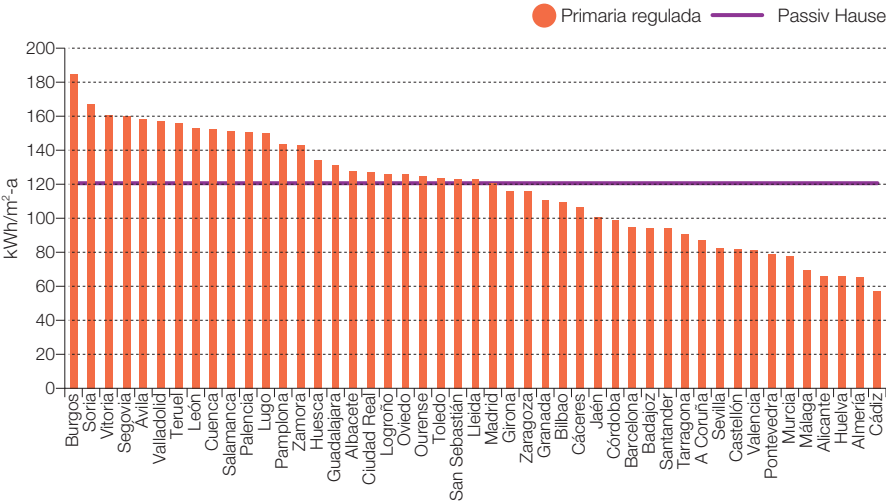
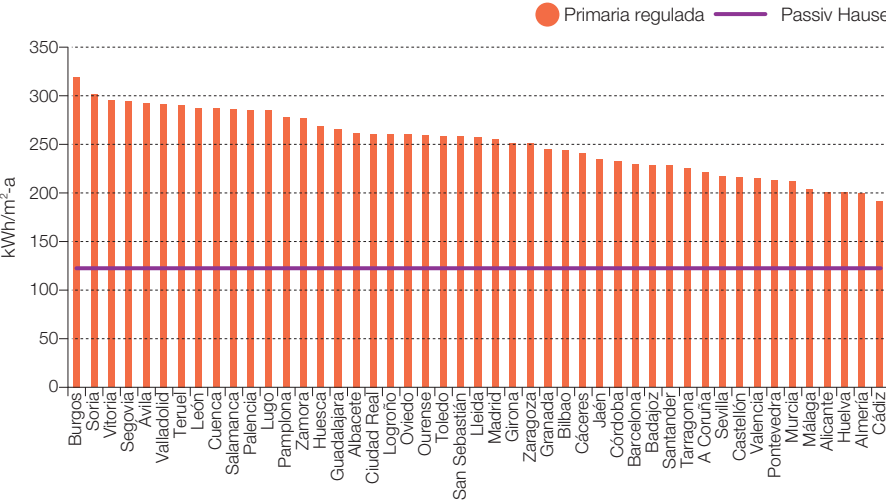


Figura 243. Consumo medio de energía primaria total en viviendas unifamiliares cumpliendo CTE.



estándar están totalmente internalizadas.

551 Vamos a considerar que en la demanda energética de climatización se encuentra también incluido el consumo para ventiladores y bombas.

552 Para la elaboración de los escenarios de este estudio, hemos tomado como punto de partida la demanda de servicios, que en esencia consideramos igual para los escenarios BAU y eficientes. Este planteamiento es conservador en el sentido de no condicionar los potenciales de eficiencia a un cambio radical en la estructura de la demanda de servicios. Pero no debe perderse de vista que la eliminación de aquella parte de la demanda de servicios que pueda resultar superflua facilita de forma significativa la evolución hacia un contexto E3.0, y en esencia constituye un signo de inteligencia en el sistema social.

553 Los factores de conversión de energía final a energía primaria que hemos usado en este apartado, así como los correspondientes factores de emisiones de CO₂, son los valores implementados en la calificación energética de edificios. Sin embargo, es preciso apuntar que estos factores de conversión pueden diferir mucho de los que tengamos en el futuro (escenarios). Es más, para el caso del factor de emisiones de la electricidad, el valor implementado en el procedimiento de calificación energética de edificios (649 g CO₂/kWh) se encuentra incluso ya en la actualidad muy alejado de los valores de 270 g CO₂/kWh del sistema eléctrico español en 2009 (CNE).

554 El estándar Passiv Haus establece un límite de consumo energético en términos de energía primaria de 120 kWh/m²-a, incluyendo las siguientes componentes de consumo dentro de este límite: calefacción, refrigeración, ventilación, ACS, iluminación y electrodomésticos. Por tanto vemos que representa una referencia apropiada para el consumo de energía primaria total (y no tan solo de la energía primaria regulada en nuestro país). Respecto a sus exigencias en términos de limitación de la demanda de climatización, este estándar desarrollado en países centro y norte europeos, en los que domina la demanda de calefacción establecen un límite de 15 kWh/m²-a para la demanda de climatización. El estándar se fundamenta en la aplicación de super-aislamiento

Figura 244. Emisiones de CO₂ medias en viviendas unifamiliares cumpliendo CTE.

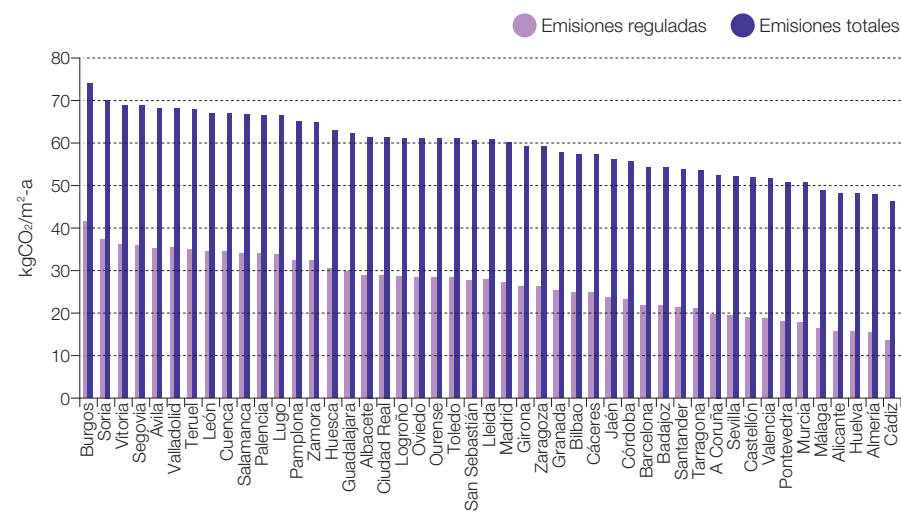
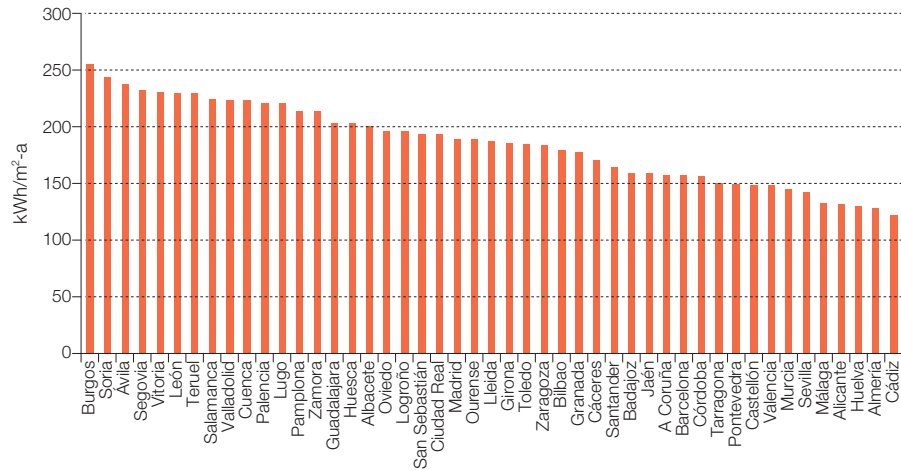


Figura 245. Consumo medio de energía final total en viviendas unifamiliares cumpliendo CTE.



En referencia a la electrificación que aparece recogida en las figuras, definimos como tal el porcentaje de la energía final que se consume en forma de electricidad, y nos proporciona una indicación de la exigencia que imponen los edificios sobre el sistema eléctrico.

en componentes opacas y acristalamiento, eliminación de puentes térmicos, reducción de infiltraciones, recuperación de calor del aire de ventilación, empleo de ventiladores eficientes, y aplicación de tecnologías de bomba de calor en condiciones eficientes (entre impulsión y extracción del aire de ventilación).

555 Algunas regiones de Alemania, Suecia. Otros países (Austria, Holanda, UK) han expresado sus intenciones de incorporar este estándar antes de 2015.

556 Aunque como hemos comentado finalmente la versión definitiva de la nueva directiva de eficiencia energética en los edificios (2010/31/UE) se decantó por introducir el requerimiento de edificios de consumo *casi nulo* a partir del año 2020. Sin embargo, la indefinición del término *casi nulo* hace que en la práctica no se sepa si el resultado será más o menos exigente que el estándar Passiv Haus.

557 Aproximadamente la media.

558 Correspondiendo por tanto a una calificación energética D.

559 En efecto, son los valores correspondientes a los coeficientes de emisiones empleados en la calificación energética, y a pesar de los errores que puedan contener algunos de estos coeficientes de emisiones "oficiales", conducen a un indicador absoluto de emisiones permitidas en esa categoría de edificio.

Figura 246. Electrificación media en viviendas unifamiliares cumpliendo CTE.

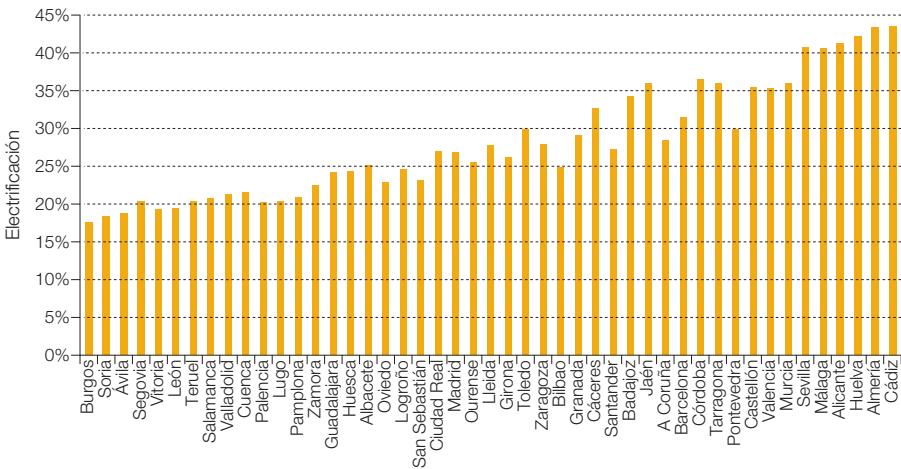


Figura 247. Consumo medio de energía primaria regulada en viviendas bloque cumpliendo CTE.

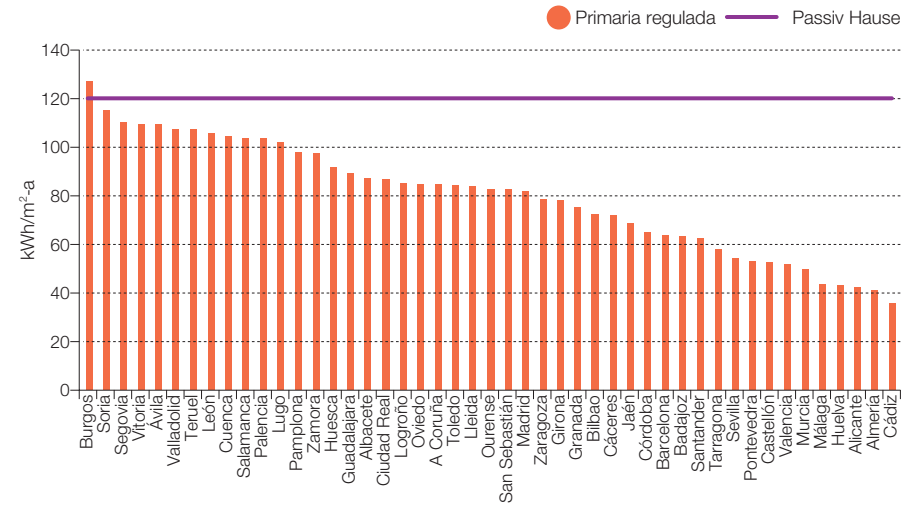


Figura 248. Consumo medio de energía primaria total en viviendas bloque cumpliendo CTE.

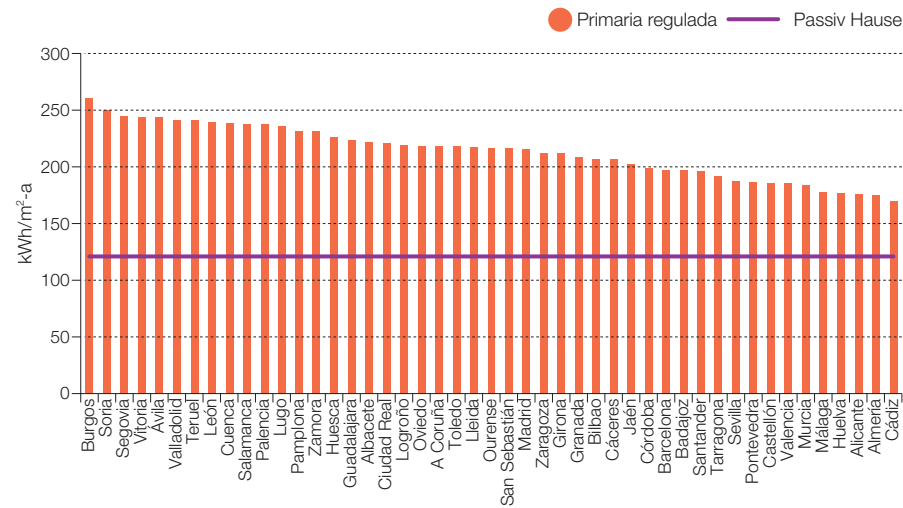


Figura 249. Emisiones de CO₂ medias en viviendas bloque cumpliendo CTE.

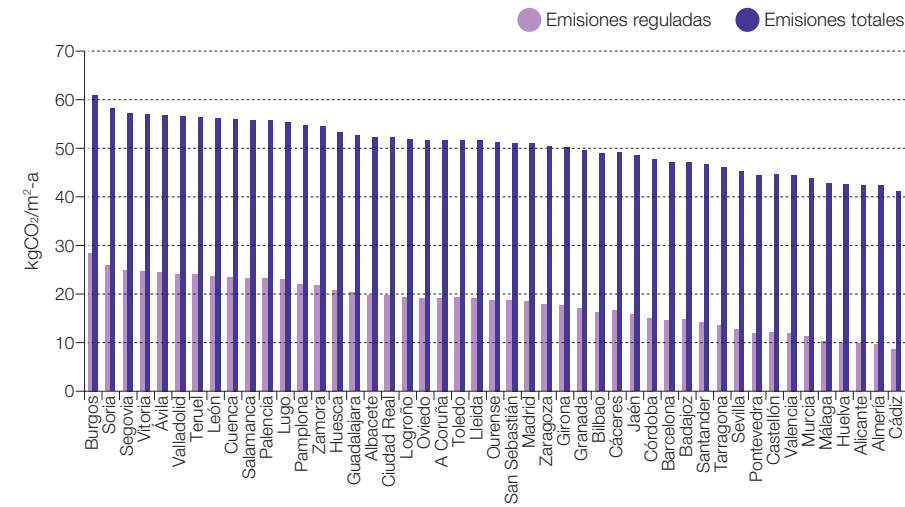


Figura 250. Consumo medio de energía final total en viviendas bloque cumpliendo CTE.

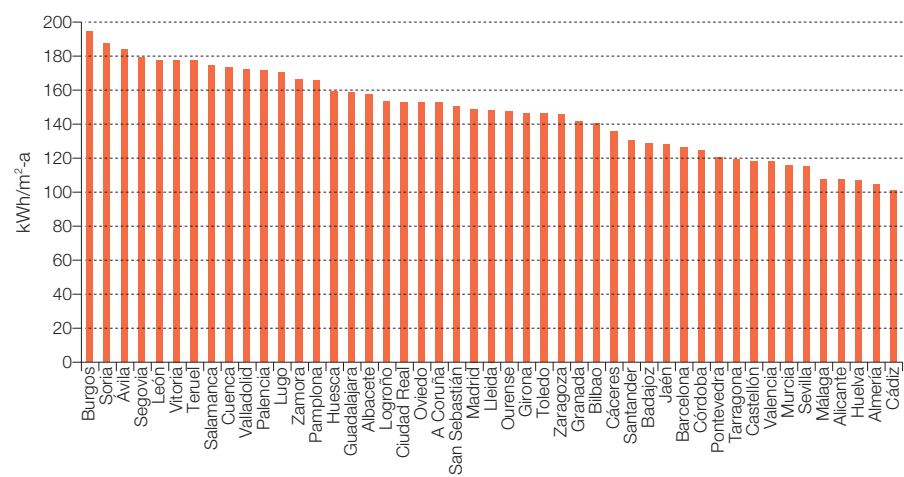
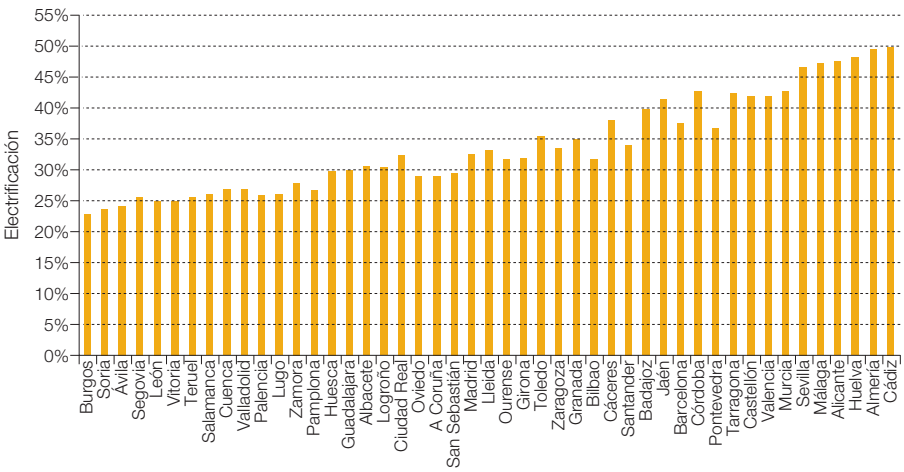


Figura 251. Electrificación media en viviendas bloque cumpliendo CTE.



A la vista de estos resultados podemos extraer varias conclusiones:

- Al observar los gráficos de energía primaria total, podemos concluir que los niveles permitidos de consumo de energía son muy elevados, lo cual es todavía más crítico si tenemos en cuenta que el procedimiento regulatorio no evita que lo realmente construido tenga un desempeño peor que lo proyectado.
- Resulta interesante comparar estos niveles permitidos de consumo de energía primaria total con los correspondientes al estándar Passiv Haus. Para los emplazamientos de mayor severidad climática de invierno, como Burgos, el consumo de energía primaria permitido por la regulación española es del orden del 270% superior al límite de Passiv Haus. Si tenemos en cuenta que la severidad climática de invierno en los países donde está implementado el estándar Passiv Haus (Alemania, Suecia) es considerablemente superior a la de España, podemos concluir que en el caso de extender la certificación energética de España a esos países, el nivel de consumo de energía primaria permitido sería incluso superior al que encontramos para las provincias españolas.
- Al fijarnos en los gráficos de energía primaria regulada, observamos que hay una gran variación espacial de los consumos permitidos⁵⁶⁰, con un factor superior a tres entre los consumos regulados permitidos en Burgos y los permitidos en Cádiz. Este resultado contrasta por ejemplo con la regulación en EE. UU., donde tal y como veremos más adelante con la aplicación de los DOE Benchmarks a las provincias españolas, el nivel permitido de consumo energético regulado es mucho más uniforme. En este sentido, parece que las discriminaciones climáticas

introducidas en España son excesivas, y tendría todo el sentido eliminar tal discriminación climática e imponer un objetivo de consumo común (tipo Passiv Haus).

- El estándar Passiv Haus, si bien parece apropiado y alcanzable en las condiciones actuales, debería hacerse bastante más exigente de cara al futuro próximo si se quiere acotar el impacto del sector edificación sobre el sistema energético, y especialmente en el planteamiento de integración de dicho sistema energético en el que se incrementa mucho la electrificación del sector edificación.
- También es de resaltar la gran diferencia entre el consumo regulado y el total: Los elementos que quedan fuera de la regulación, no solo tienen un peso muy importante, sino que además, con el paso del tiempo, son los que tienen tendencia a ir aumentando.

A la vista de los resultados anteriores, cabe preguntarse: ¿tiene sentido el proporcionar una mayor permisividad según la severidad climática de invierno del emplazamiento? Desde nuestro punto de vista la respuesta es que no, y menos teniendo en cuenta que países con severidades climáticas de invierno más elevadas que las que encontramos en España ya están adoptando estándares mucho más exigentes como el Passiv Haus. Parece tener toda la lógica que si un emplazamiento tiene mayor severidad climática de invierno que otro, los edificios en ese emplazamiento deberían construirse con mayores niveles de aislamiento. Esto puede conducir a un coste del m² de edificio construido algo superior en los emplazamientos de severidad climática de invierno elevada⁵⁶¹, pero a unos costes de operación parecidos. El enfoque actual, parece estar totalmente alineado con el anterior enfoque del sistema económico: vender

⁵⁶⁰ Así mismo, hay una importante variación entre los valores permitidos para viviendas en bloque y los de viviendas unifamiliares.

⁵⁶¹ Aunque esto en parte se compensará con los menores requerimientos para reducir la demanda de refrigeración, que no se encuentra totalmente internalizada en la regulación energética actual.

casas en lugar de servicios. Pero en un enfoque de economía inteligente donde lo que se venden son los servicios, debería cambiarse radicalmente el enfoque, asignando un valor homogéneo para todo el territorio del consumo de energía permitido.

Yendo más allá, parece que lo más coherente sería imponer un nivel del consumo permitido para el total del edificio según un baremo prefijado de ocupación (m^2/p). Por ejemplo, si se fijara una referencia de ocupación de los edificios en términos de m^2/p , modulado con consideraciones del uso del edificio (por ejemplo, si el edificio se usa para vivir y para trabajar, se aumenta la dotación ocupacional disponible), si alguien decide que quiere más m^2/p , pues debería hacer más eficiente el edificio para mantener el mismo consumo energético de alguien que decida ajustar el valor de m^2/p a la dotación de referencia o incluso hacerlo menor. En efecto, la opción de reducir los m^2/p es desde un punto de vista energético equivalente a la de hacerse con una caldera más eficiente, por lo que debería dejarse libre esta variable. La situación actual en la que en el mejor de los casos⁵⁶² se impone un límite a los kWh/ m^2 -a, es tal que permite el despilfarro energético si un usuario decide tener muchos más m^2/p en su edificio⁵⁶³.

3.7.1.12.1.1 Demanda energética del parque actual: edificios residenciales

En este punto recopilamos una primera aproximación de la estructura energética del parque de edificios residenciales actual, obtenida considerando que queda correctamente representado por una degradación del 135%⁵⁶⁴ del límite entre las calificaciones D y E de la escala de calificación de edificios residenciales nuevos⁵⁶⁵. Esta hipótesis parece razonable, e incluso algo optimista, en el contexto de

la regulación actual en el que la degradación experimentada por los edificios de la muestra empleada para configurar la escala de calificación de edificios nuevos⁵⁶⁶ al pasar de los límites C-D al límite D-E de la escala es del 140-149% en todas las provincias.

Las figuras 252 a 255 nos muestran los resultados correspondientes a las viviendas unifamiliares, mientras que las figuras 256 a 259 recogen los resultados correspondientes a las viviendas en bloque. Como podemos ver al analizar los gráficos correspondientes al consumo de energía primaria total, los niveles de consumo del parque residencial actual en los emplazamientos de mayor severidad climática pueden llegar a ser del orden del 400% de lo permitido por el estándar Passiv Haus.

Estos grandes niveles de consumo permitido no tienen porqué verse reflejados actualmente en los indicadores macro⁵⁶⁷ del consumo del sector edificación, pues la adaptación socioeconómica de las condiciones de confort y uso de equipamientos pueden entrar en juego y evitar que se internalice toda la demanda potencial. Pero sin embargo, estos niveles de consumo sí que son indicativos del consumo potencial del sector edificación a medida que se internalicen todas las demandas de servicios energéticos.

562 Tampoco es así en la regulación española por el uso de referencias variables que conducen a que incluso los edificios que cumplen estrictamente con la regulación tengan una dispersión que les haga distribuirse por la escala de certificación desde la B a la E o menor.

563 En cierta forma esta situación es análoga al tema de los vehículos: el límite de emisiones permitidas no debería depender del tipo de vehículo adquirido siempre y cuando sea para un mismo tipo de uso.

564 Como indicábamos más arriba, una degradación o coeficiente de degradación del 135% quiere decir que el consumo de energía del parque actual es un 135% superior al correspondiente al límite entre las calificaciones D y E.

565 Por tanto esta degradación afecta tan solo a las componentes de demanda reguladas.

566 Todos ellos edificios que estrictamente cumplen el CTE, y por tanto en principio mejores que los edificios del parque actual.

567 Como los correspondientes a los datos de la AIE.

Figura 252. Consumo medio de energía primaria regulada en viviendas unifamiliar parque actual.

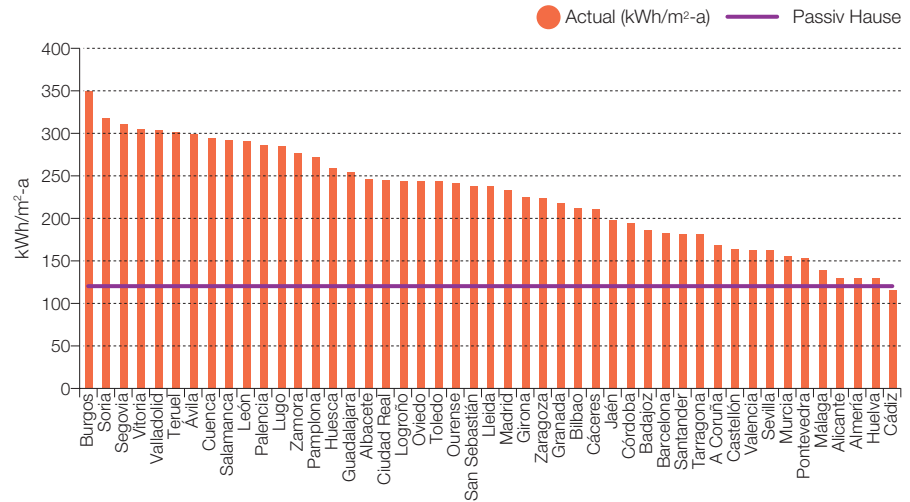


Figura 253. Consumo medio de energía primaria total en viviendas unifamiliar parque actual.

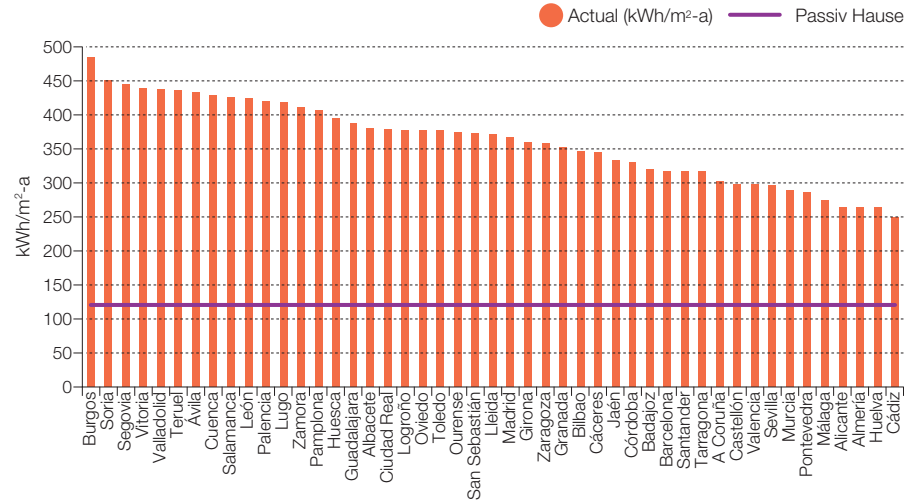


Figura 254. Consumo medio de energía final total en viviendas unifamiliar parque actual.

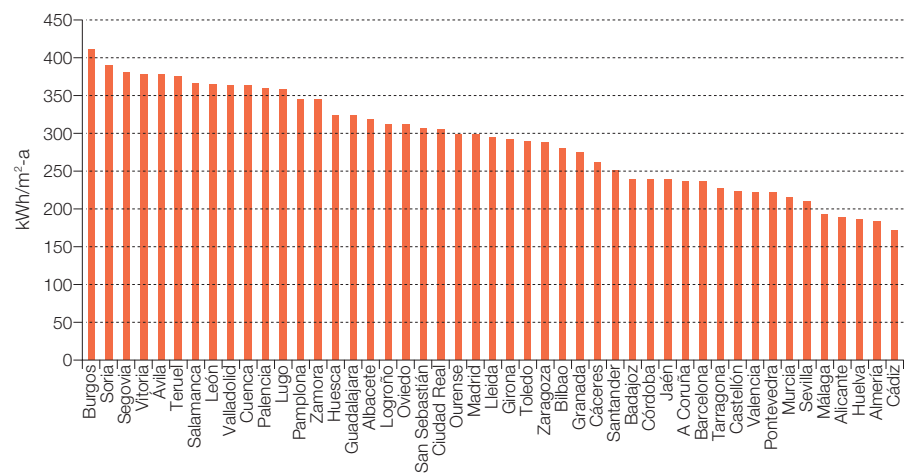


Figura 255. Electrificación en viviendas unifamiliar parque actual.

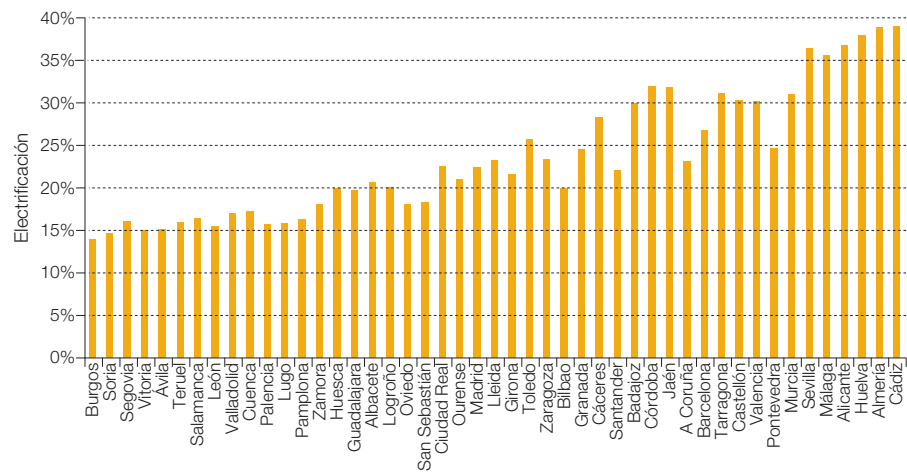


Figura 256. Consumo medio de energía primaria regulada en viviendas bloque parque actual.

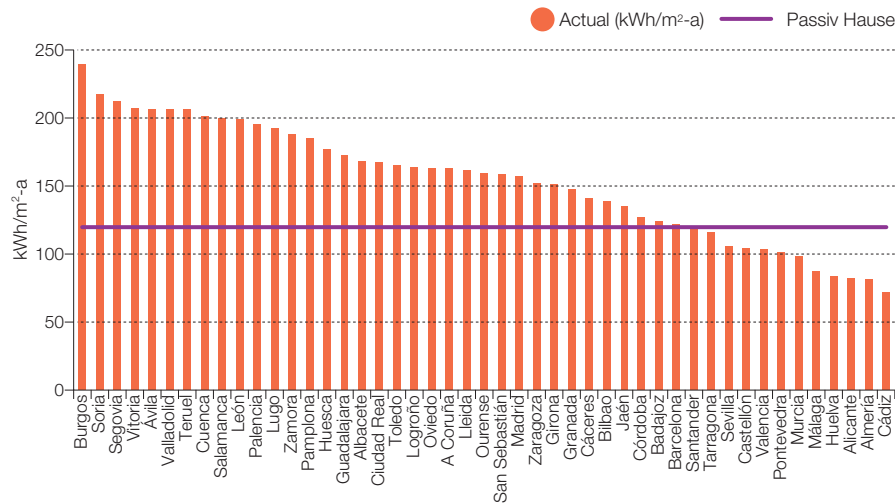


Figura 257. Consumo medio de energía primaria total en viviendas bloque parque actual.

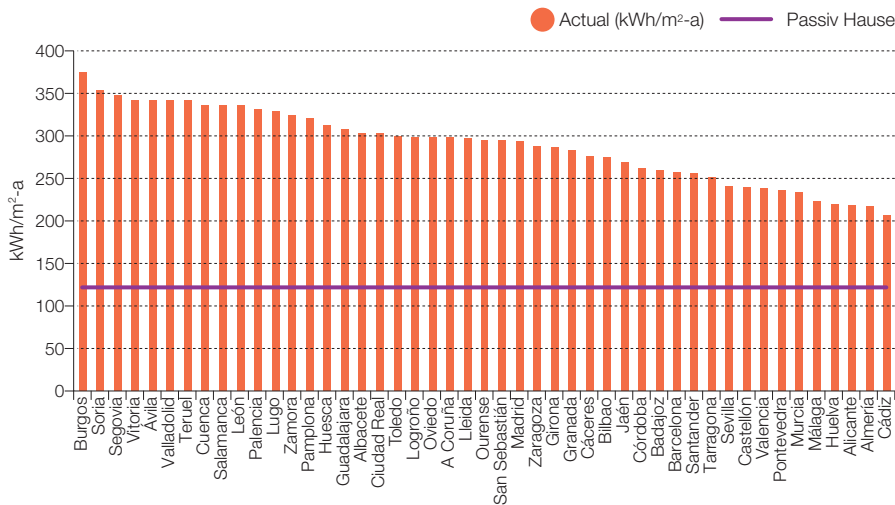


Figura 258. Consumo medio de energía final total en viviendas bloque parque actual.

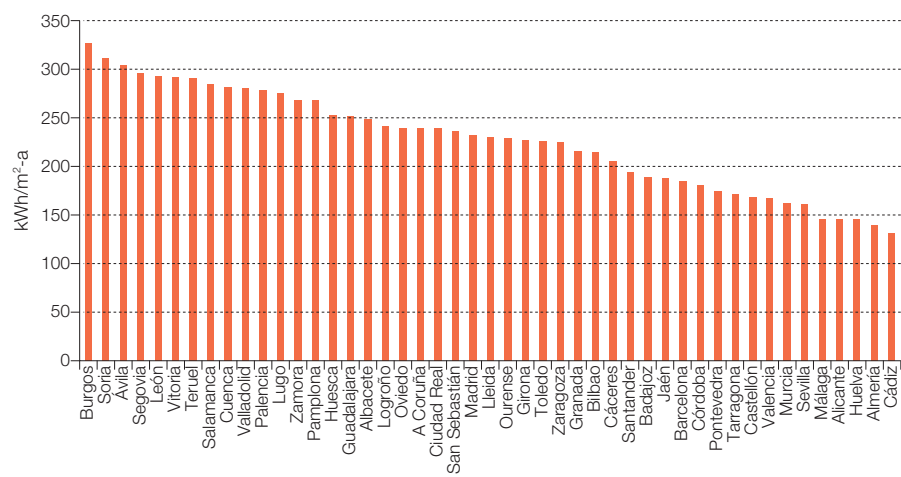
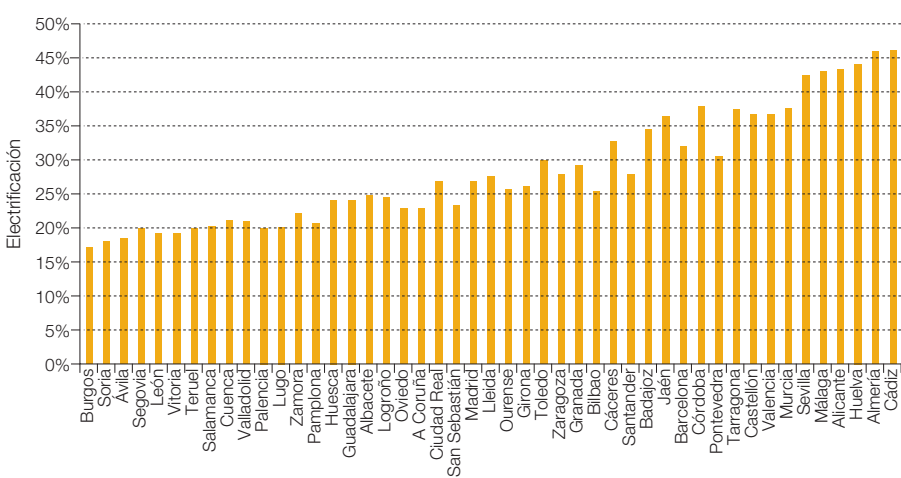


Figura 259. Electrificación en viviendas bloque parque actual.

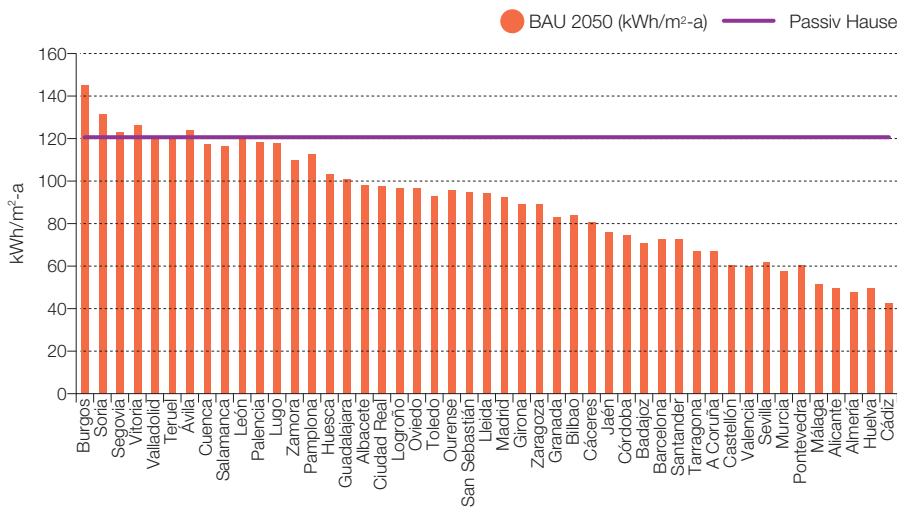


3.7.1.12.1.2 Demanda energética BAU 2050: edificios residenciales

En este punto recogemos los resultados de una primera aproximación a lo que podría ser el BAU del sector edificación residencial en el año 2050. Esta primera aproximación se ha obtenido con la hipótesis de que la media del parque edificatorio en el año 2050 se consigue colocar en el punto medio del intervalo de consumos correspondiente a la calificación C de la calificación energética de edificios residenciales nuevos⁵⁶⁸.

En las figuras 260 a 263 presentamos los resultados correspondientes a las viviendas unifamiliares, mientras que en las figuras 264 a 267 recogemos los resultados asociados a las viviendas multifamiliares en bloque. Como podemos observar en los gráficos de consumo de energía primaria total, en el contexto actual, los BAU para el año 2050 pueden llegar a permitir hasta un 260% del consumo que hoy ya fija el estándar Passiv Haus en los emplazamientos de mayor severidad climática de invierno de nuestro país.

Figura 260. Consumo medio de energía primaria regulada en viviendas unifamiliar parque BAU 2050.



⁵⁶⁸ Esta hipótesis podría considerarse excesivamente optimista a la luz de que por un lado estamos hablando del promedio de todo el parque de edificios, y de que por otro lado los edificios nuevos que se están construyendo actualmente (y que por tanto estarán presentes en el año 2050), sobre el papel tendrán en promedio una calificación D, con edificios que caerán dentro de la calificación E o inferior, y que además puede existir una importante divergencia entre lo que se justifica sobre el papel (cumplimiento del CTE y calificación energética) y lo finalmente ejecutado en obra.

Figura 261. Consumo medio de energía primaria total en viviendas unifamiliar parque BAU 2050.

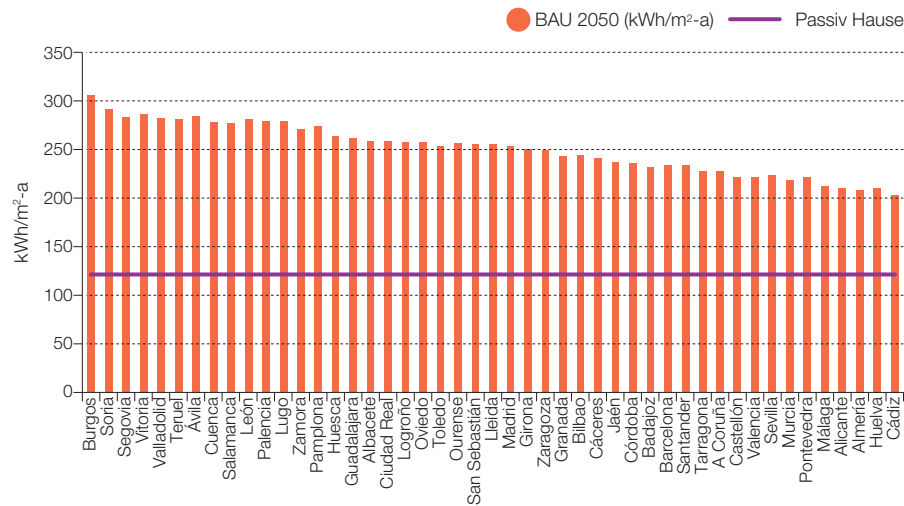


Figura 262. Consumo medio de energía final total en viviendas unifamiliar parque BAU 2050.

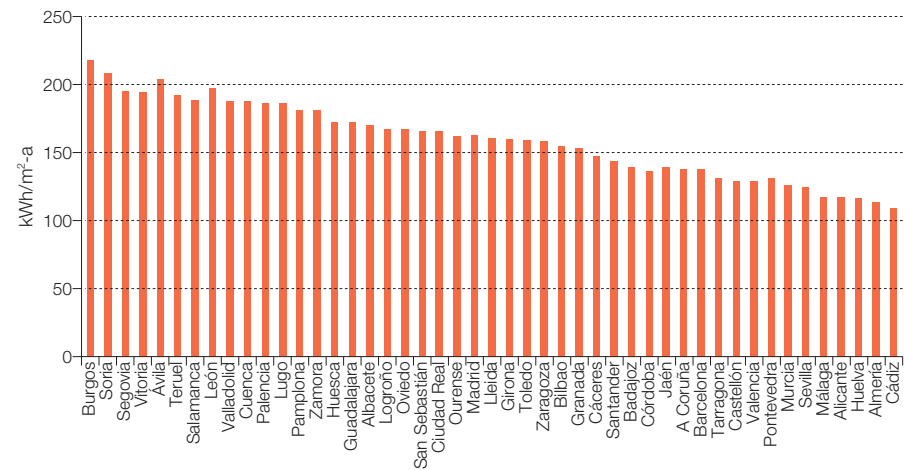


Figura 263. Electrificación en viviendas unifamiliar parque BAU 2050.

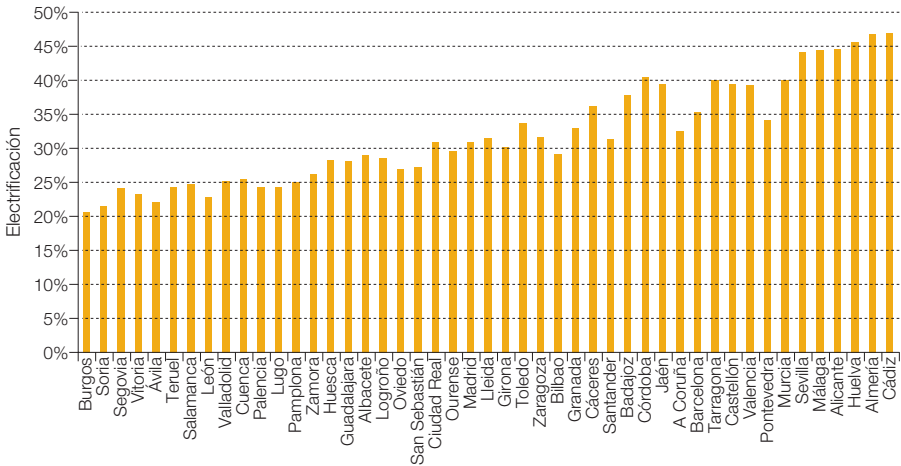


Figura 264. Consumo medio de energía primaria regulada en viviendas bloque parque BAU 2050.

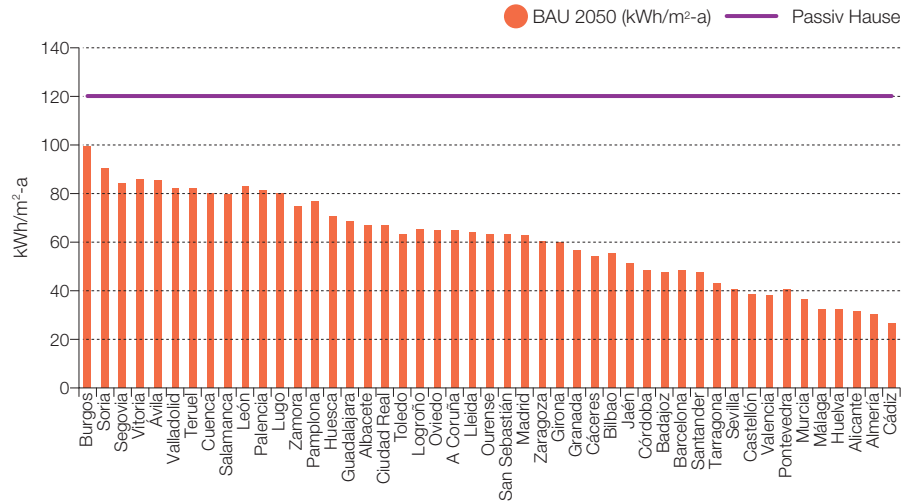


Figura 265. Consumo medio de energía primaria total en viviendas bloque parque BAU 2050.

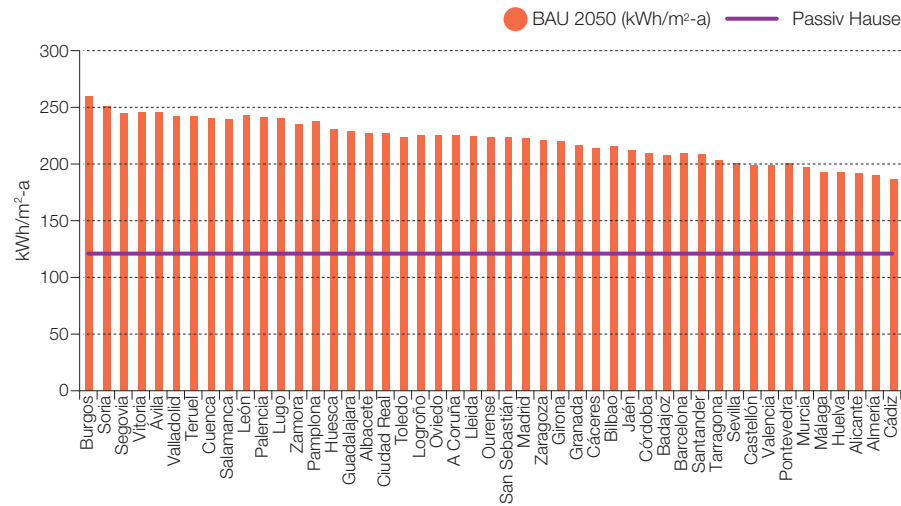


Figura 266. Consumo medio de energía final total en viviendas bloque parque BAU 2050.

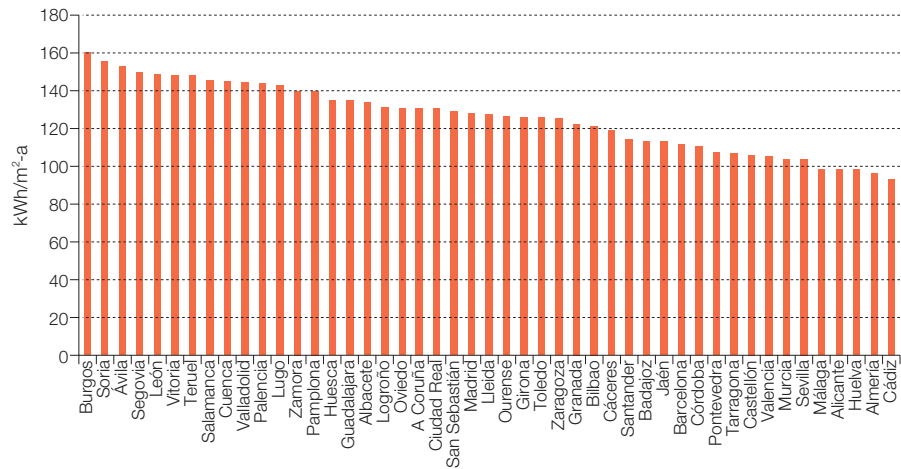
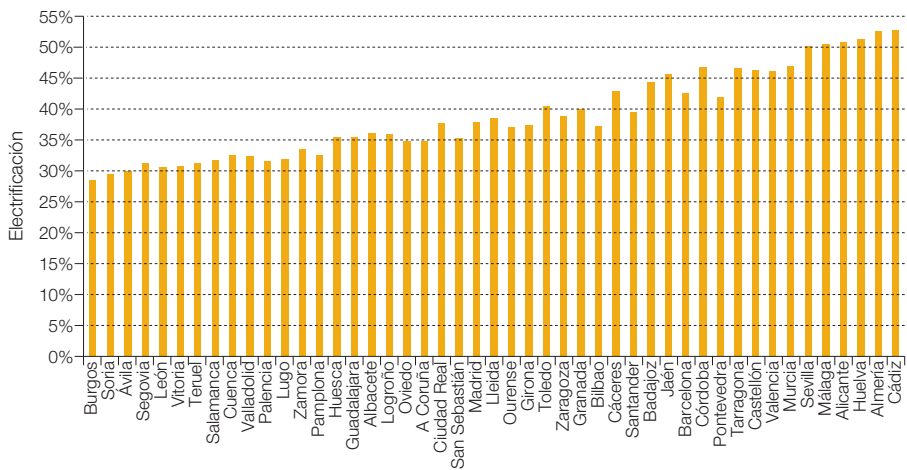


Figura 267. Electrificación en viviendas bloque parque BAU 2050.



3.7.1.13 Edificios de referencia en US

Como ya hemos mencionado anteriormente, los únicos edificios de referencia para las distintas tipologías modales que se pueden encontrar en el sector edificación, suficientemente elaborados y mantenidos que hemos localizado, son los desarrollados por el departamento de energía de los EE. UU. (DOE Benchmarks⁵⁶⁹).

Estos modelos de edificios comerciales están disponibles desde 1991, y se han ido adaptando para poder representar el parque de edificios en distintos periodos de tiempo, calibrando los resultados con la extensa información asociada a la caracterización del parque de edificios comerciales que AIE de EE. UU. actualiza cada cuatro años. Puesto que estos modelos se encuentran implementados en formatos compatibles con programas de simulación de edificios, su uso en el campo de la investigación de medidas de eficiencia en este sector se ha extendido significativamente, especialmente bajo el paraguas del

programa Net Zero Energy Commercial Building Initiative que el DOE ha lanzado con el objetivo de hacer disponibles edificios de consumo neto cero para el año 2025. Existen diversas publicaciones⁵⁷⁰ analizando las posibilidades de reducción del consumo de energía total de distintas tipologías de edificios entre un 30% y un 50%, que se basan en el uso de los DOE Benchmarks para cuantificar el efecto de distintas medidas de eficiencia, y sin duda irán surgiendo más en los próximos años. En este sentido, los DOE Benchmarks proporcionan un marco de referencia común sobre el que edificar el análisis del potencial de mejoras, y el hecho de que se encuentren implementados en el formato compatible con las herramientas de simulación de edificios más avanzadas, permite obtener mucho detalle sobre la estructura de la demanda energética de los edificios.

Por todos estos motivos, y puesto que para España no existen otros edificios de referencia disponibles, hemos optado por particularizar estos edificios de referencia para los

569 Deru, M.; Field, K.; Studer, D.; Benne, K.; Griffith, B.; Torcellini, P.; Halverson, M.; Winiarski, D.; Liu, B.; Rosenberg, M.; Huang, J.; Yazdani, M.; Crawley, D. DOE Commercial Building Research Benchmarks for Commercial Buildings. Washington, DC: U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, versión marzo 2010.

570 (Yu Joe Huang, Jim Brodrick, 2000), (R.E. Jarnagin, B. Liu, D.W. Winiarski, M.F. McBride, L. Suhari, D. Walden, 2006), (B. Griffith, P. Torcellini, N. Long, D. Crawley, J. Ryan, 2007), (Torcellini P., Deru M., Griffith B., Benne K., Halverson M., Winiarski D., Crawley D.B., 2008), (BA Thornton, W Wang, MD Lane, MI Rosenberg, 2009), (W Jiang, K Gowri, MD Lane, BA Thornton, MI Rosenberg, 2009), (Elaine Hale, Matthew Leach, Adam Hirsch, and Paul Torcellini, 2009), (Matthew Leach, Elaine Hale, Adam Hirsch, and Paul Torcellini, 2009).

emplazamientos climáticos de España y emplearlos como base para configurar los escenarios BAU y E3.0.

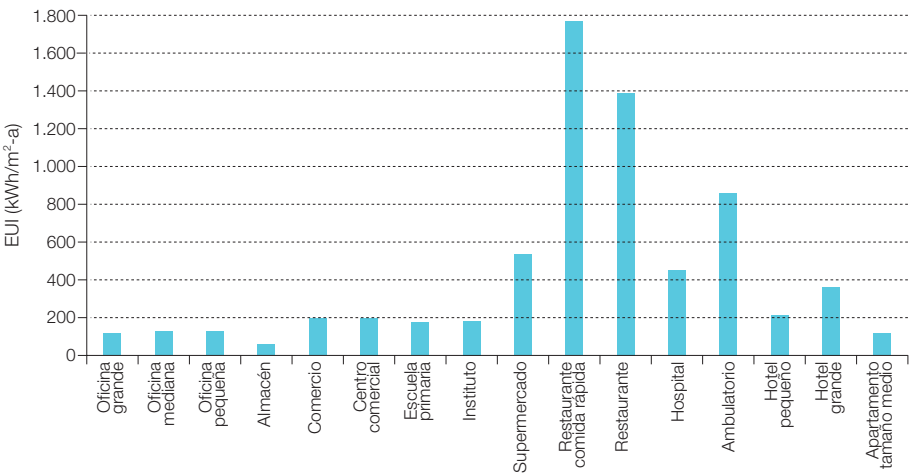
En este punto proporcionamos una información preliminar sobre estos edificios de referencia dejando más adelante la presentación de resultados correspondientes a los escenarios BAU y E3.0 obtenidos con ellos.

Los DOE Benchmarks para representar la construcción actual tienen sus parámetros ajustados con el estándar 90.1-2004 de Ashrae⁵⁷¹, lo cual afecta tanto a los niveles de prestación de los elementos de la envolvente de los edificios (aislamientos, características de ventanas, etc.), como a los requerimientos de eficiencia sobre los equipamientos implementados por los edificios (calderas, enfriadoras, ventiladores, recuperación de calor, enfriamiento gratuito, iluminación, etc.). Los tipos de sistemas de climatización implementados en cada tipo de edificio fueron elegidos según

la información recopilada en el CBECS⁵⁷² del año 2003 para representar correctamente el parque de edificios existente. Por lo que respecta al nivel de consumo de los equipamientos internos, estos tampoco se encuentran regulados por la regulación en EE. UU., por lo que el std 90.1 no estipula ninguna limitación. Sin embargo, los DOE Benchmarks sí que implementan niveles de consumo por equipamientos representativos de las condiciones actuales en las distintas tipologías de edificios. Por tanto, los consumos energéticos que se desprenden de los DOE Benchmarks corresponden al consumo total del edificio, y no tan solo a la componente regulada de dicho consumo.

Los DOE Benchmarks están constituidos por 16 modelos de tipología de edificios que cubren los principales modos dentro del sector comercial, y los edificios residenciales en bloque de pisos (que a su vez dominan el reparto modal de edificación residencial).

Figura 268. Consumo de energía final de los edificios del DOE Benchmark en el emplazamiento representativo de la zona 3A. Emplazamientos en España que caen dentro de esta zona climática son: Cádiz, Córdoba, Málaga, Sevilla, Tarragona y Cáceres.



571 El std. 90.1 de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) es el encargado de imponer los límites regulatorios a las prestaciones energéticas de todos los edificios excepto los residenciales pequeños, complementado por otros estándares como el std 62.1 encargado de establecer los requerimientos de ventilación y el std 55 que estipula las condiciones de confort. La estructura del std 90.1 es parecida a la de la regulación actual en España (CTE + RITE), pero significativamente más exigente en varios aspectos, y más exhaustivo por lo que se refiere a los componentes sobre los que impone requerimientos de eficiencia. Este estándar se actualiza cada tres años, de tal forma que la versión actualmente vigente para la mayoría de procesos regulatorios o de certificación que se apoyan en él es la de 2007 (std 90.1-2007). Los DOE Benchmarks están ajustados a la versión anterior: std. 90.1-2004.

572 Informe que cada cuatro años actualiza la AIE de la administración de EE. UU. con una detallada caracterización de la estructura energética del sector edificación comercial.

Figura 269. Consumo de energía final de los edificios del DOE Benchmark en el emplazamiento representativo de la zona 4A. Emplazamientos en España que caen dentro de esta zona climática son: Huesca, Teruel, Oviedo, Palencia, Salamanca, Segovia, Valladolid, Cuenca, Guadalajara, Girona, Lugo, Madrid, Pamplona, Vitoria y San Sebastián.

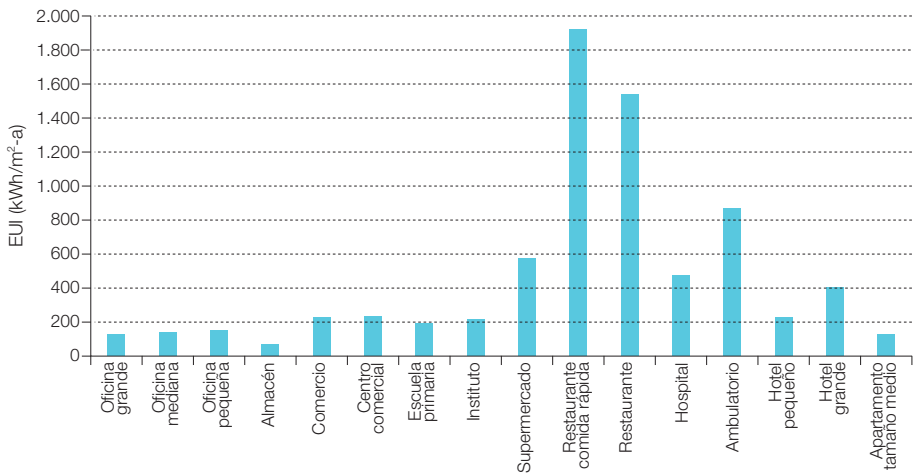
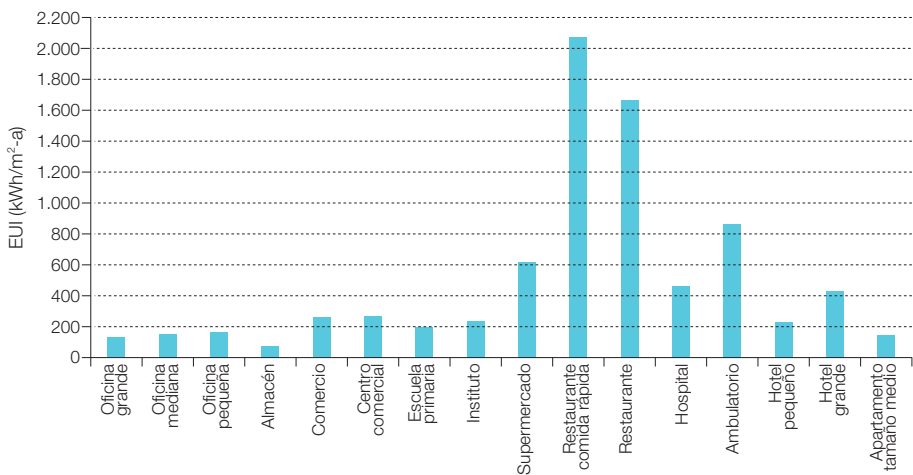


Figura 270. Consumo de energía final de los edificios del DOE Benchmark en el emplazamiento representativo de la zona 5A. Emplazamientos en España que caen dentro de esta zona climática son: Ávila, Burgos, León y Soria.



Un primer punto que resulta relevante es la diferencia de consumos específicos entre los distintos modos de edificios, tanto por lo que respecta a la cantidad de energía, como por lo relativo a la distribución estacional y diaria de este consumo. En efecto, en bien poco se parecen tipologías de edificios como el residencial, la oficina, un hospital o un restaurante, tanto por los horarios de operación, como por los niveles de cargas internas y consumos de proceso asociados a su operación. Para tener una primera cuantificación de este aspecto, en las figuras 268 a 270 presentamos los consumos en términos de energía final específica (EUI⁵⁷³) de los DOE Benchmarks en tres zonas climáticas⁵⁷⁴, presentes en la España peninsular. Más adelante, a lo largo de este informe, iremos presentando los resultados de consumo energético particularizados para las provincias españolas, así como la estructura de la demanda energética de las distintas tipologías de edificios considerados.

3.7.1.14 Comparativa edificios referencia US con parque actual y BAU en España: Caso residencial

Puesto que para el parque de edificios residenciales es el único para el que disponemos en España de algo más de información relativa a las exigencias energéticas sobre la construcción actual, y dado que esta información que se desprende del proceso de certificación energética ya la hemos procesado en un punto anterior, resulta interesante analizar cómo compara el DOE Benchmark de edificio residencial con estos resultados. En este punto desarrollamos este análisis, que conduce a una conclusión muy relevante de cara al desarrollo de los escenarios: el BAU de los edificios residenciales en España para el año 2050 queda bien representado por el DOE Benchmark actual⁵⁷⁵.

Para que los resultados de consumo de los edificios que se desprenden por un lado del análisis de la certificación energética de edificios residenciales nuevos, y por otro lado de los DOE Benchmarks sean comparables, dicha comparación la realizaremos por un lado en términos de energía final (sin descontar aporte solar térmico⁵⁷⁶ al que fuerza el CTE), y por otro lado en términos de energía primaria⁵⁷⁷ (para reflejar el efecto del grado electrificación), y con elementos de consumo no regulados⁵⁷⁸ del mismo orden.

También es de destacar el hecho de que en el caso de los DOE Benchmarks, en todos los emplazamientos climáticos de España aparece demanda de refrigeración en verano, mientras que en la calificación energética muchas provincias no presentan demanda de refrigeración. Esto es debido a un elemento artificial introducido por la calificación energética⁵⁷⁹ de edificios residenciales en España, mediante el cual se presupone que el edificio no requiere refrigeración⁵⁸⁰ en las partes centrales del día, y se implementa una refrigeración por ventilación nocturna que por “arte de magia”⁵⁸¹ actúa durante las noches de verano proporcionando valores de renovación del aire elevados⁵⁸². Esta situación conduce a que en la práctica de la operación real de los edificios, las condiciones de confort en temporada de refrigeración que proporciona el edificio, operado según la calificación energética, son inferiores a las que otorga el DOE Benchmark. En el caso de que ambas condiciones de confort fueran parecidas, el consumo energético de los edificios según la calificación energética resultaría superior.

En las figuras 271 a 273 presentamos la comparativa de resultados a nivel provincial entre el BAU 2050 que dedujimos de la estructura del proceso de calificación energética de edificios residenciales nuevos en España, y el

⁵⁷³ EUI: Energy use intensity

⁵⁷⁴ Zonas correspondientes a la zonificación climática de ASHRAE.

⁵⁷⁵ Es importante resaltar el hecho de que el BAU es para el año 2050 y representa a la media del parque de edificios existentes en ese año, muchos de los cuales serán los que actualmente se están construyendo, mientras que el DOE Benchmark actual, refleja los requerimientos de la regulación de EE. UU. para el año 2004 (std 90.1-2004), que al ser una regulación más exigente que la actualmente implementada en España refleja un estándar de construcción mejor que el que ahora estamos desarrollando en nuestro país.

⁵⁷⁶ Este es un aspecto en que el CTE resulta más exigente que el std 90.1-2004, pues el CTE sí que obliga a la cobertura de parte de la demanda de ACS con energía solar térmica, mientras que el std 90.1 no tiene ninguna exigencia a este respecto. Sin embargo, puesto que por ahora estamos interesados en las demandas energéticas de los edificios, no incluimos este aspecto en la comparativa. Más adelante ya indicaremos la aproximación empleada en relación al efecto de la energía solar térmica para el desarrollo de los escenarios.

⁵⁷⁷ Para la comparación en términos de energía primaria, emplearemos parámetros comunes de conversión de energía final a primaria representativos de la situación actual en España, y por tanto distintos a los empleados en la certificación energética de edificios que emplea unos coeficientes de emisiones para la electricidad de la red muy superiores a los reales del sistema eléctrico (649 g CO₂/kWh_e frente a 270 g CO₂/kWh_e). Por este motivo, los resultados en términos de energía primaria aquí presentados no se corresponden con los asociados al capítulo dedicado al análisis de la certificación energética en España, donde se emplearon los factores de conversión relativos a dicha certificación para reflejar los niveles de emisiones realmente permitidos.

⁵⁷⁸ Tanto la iluminación como los equipamientos no se encuentran regulados por el CTE para los edificios residenciales (por lo que respecta a la iluminación, el CTE contiene la HE3 dedicada a la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación, pero se excluye explícitamente de su ámbito de aplicación a

DOE Benchmark para edificio residencial, en términos de energía final, energía primaria y electrificación.

Figura 271. Comparativa de consumo de energía final total entre el BAU 2050 deducido del análisis del proceso de calificación energética y el DOE Benchmark (bloque de pisos).

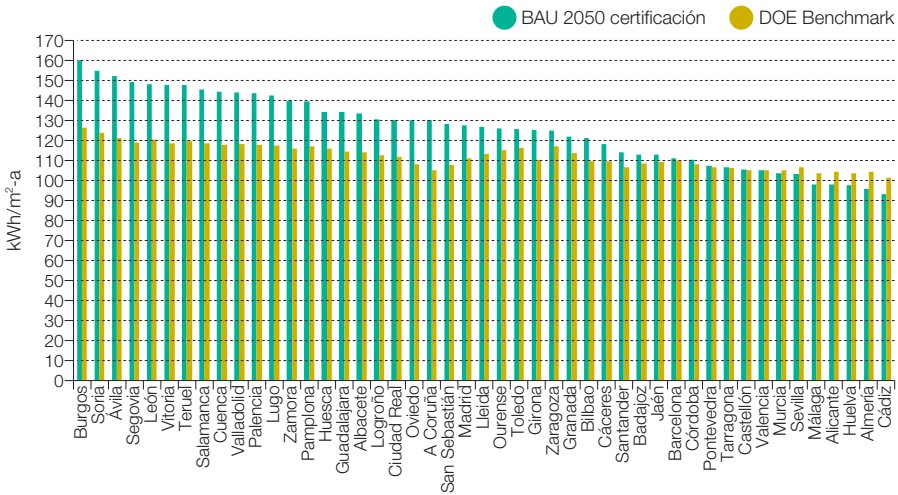
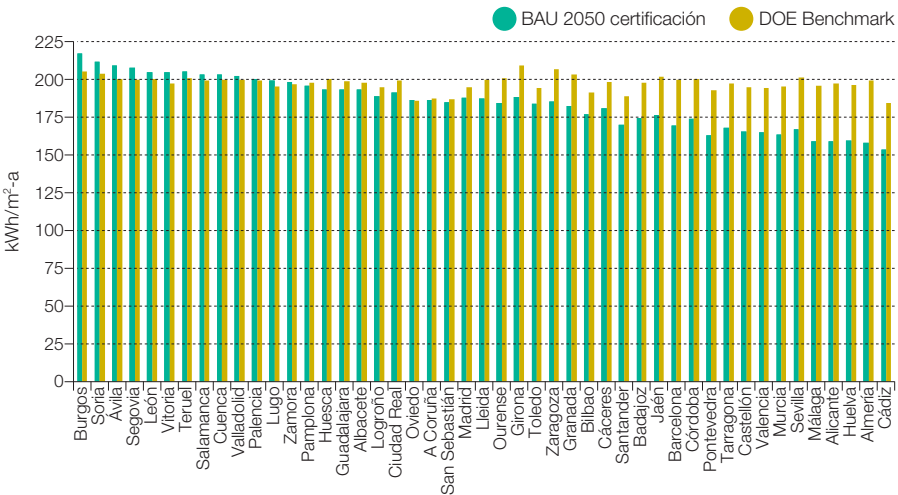


Figura 272. Comparativa de consumo de energía primaria total entre el BAU 2050 deducido del análisis del proceso de calificación energética y el DOE Benchmark (bloque de pisos).



los edificios residenciales, y en consecuencia la calificación energética de estos edificios no contempla el consumo de iluminación). Los equipamientos tampoco están regulados por el std 90.1. Por lo que respecta a la demanda de ACS tampoco se encuentra directamente regulada por ninguno de las dos regulaciones por lo que respecta a su nivel de demanda energética (si bien el CTE incluye la HE4 relativa a la contribución solar mínima de ACS). Por tanto, el valor total de estos consumos no regulados se ha introducido del mismo orden para los dos casos.

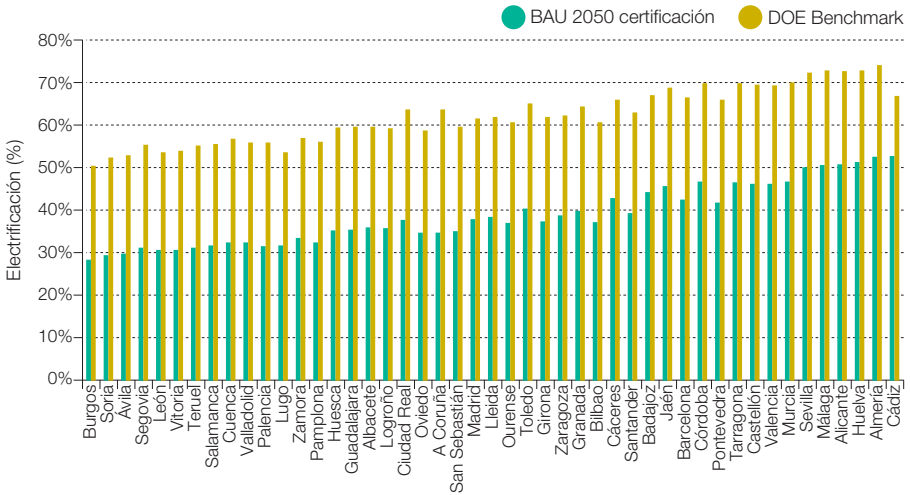
579 Y también por la regulación prestacional (herramienta LIDER).

580 Se elimina la consigna de refrigeración de 7h a 16 h. Adicionalmente la calificación energética solo considera la demanda de refrigeración de junio a septiembre. Es de resaltar que en un contexto donde las viviendas deban ser vivideras las 24 horas del día, situación que ya se presentaba de forma tradicional en que algunos miembros de las unidades familiares pasan mucho más tiempo dentro de la vivienda que otros, y que cabe esperar se acentúe el contexto E3.0 con el desarrollo del teletrabajo y la tele-educación.

581 La expresión "por arte de magia" quiere señalar el hecho de que para que realmente existiera esa refrigeración por ventilación nocturna, manteniendo exactamente la renovación del aire especificada, y actuando tan solo en esos momentos en los que fuera beneficiosa, sería preciso implementar controles inteligentes y disponer de medios mecánicos de ventilación, lo cual dista mucho de la realidad de la operación de los edificios residenciales por la noche.

582 En concreto proporciona ACH = 4 h⁻¹ (donde ACH ("air changes per hour") son las renovaciones horarias del aire dentro del edificio, es decir, el número de veces que durante una hora se renueva el aire contenido dentro del edificio), del orden de ocho veces las que existen fuera de estos horarios.

Figura 273. Comparativa de la electrificación entre el BAU 2050 deducido del análisis del proceso de calificación energética y el DOE Benchmark (bloque de pisos).



La primera observación que podemos realizar sobre estos resultados, empezando por centrar la atención en la comparativa en términos de energía final, es la mayor regularidad geográfica de la demanda del DOE Benchmark que la que se desprende del análisis basado en la calificación y regulación energética en España, donde a los climas de mayor severidad de invierno se les permite un consumo considerablemente superior. Para la variedad climática presente en España sería perfectamente lícito el imponer un límite constante en consumo total para todos los emplazamientos climáticos, lo cual a su vez contribuiría a la claridad y estaría mucho más orientado a objetivos que la situación actual, además de ser más coherente con los requerimientos constructivos en cada zona climática⁵⁸³.

La siguiente observación es la relativa a los valores inferiores de consumo del DOE Benchmark (aplicación de la regulación en EE.UU. para el año 2004: std 90.1-2004) que los deducidos del análisis de la calificación

energética en España, y eso a pesar de que en la evaluación energética de los edificios, según la calificación energética de España, no se internaliza toda la demanda de frío⁵⁸⁴, y que asumimos que el BAU podía representarse por el punto medio de la calificación C⁵⁸⁵: A igualdad condiciones de uso y confort en los edificios, todavía sería mayor la diferencia. En estas condiciones puede parecer optimista el asimilar el BAU residencial a los valores del DOE Benchmark, pero si tenemos en cuenta la regularización que se experimenta al analizar los resultados en términos de energía primaria⁵⁸⁶, consecuencia de la mayor electrificación de los DOE Benchmark, y siendo la mayor electrificación una tendencia que cabe esperar se desarrolle tanto en los contextos BAU como E3.0, y tanto para edificios nuevos como existentes, consideramos que el DOE Benchmark describe bien lo que podríamos considerar un BAU en España para representar al conjunto del parque de edificios existente en 2050. Por extensión de estos resultados, y dada la ausencia de

⁵⁸³ Equilibrio entre calefacción y refrigeración, uso eficiente de materiales, etc.
⁵⁸⁴ No refrigeración en zona central día y ventilación nocturna muy cuestionable sin elementos adicionales de inteligencia de cuatro ACH en las noches de verano.
⁵⁸⁵ Cuando la mayoría de los edificios construidos según el CTE caen dentro de la calificación D, y el BAU debe representar al conjunto del parque de edificios en 2050, cuando todavía quedará una fracción importante de edificios construida antes que el CTE.
⁵⁸⁶ Esta regularización es para las condiciones actuales del sistema energético en España. En un contexto de renovables 100% con smart grid (bajas pérdidas T&D), el rendimiento efectivo del sistema eléctrico sería próximo al 100%, por lo que las distribuciones de consumo en términos de energía final y de primaria serían muy parecidas a la distribución de consumos de energía final presentada en la figura anterior.

otra información referente a la caracterización energética de los edificios comerciales en España, damos también como válidos los DOE

Benchmark para representar el BAU del parque de los edificios no residenciales en España para el año 2050.

Figura 274. Comparativa de consumo de energía final total entre la media de los edificios construidos según CTE y el DOE Benchmark (bloque de pisos).

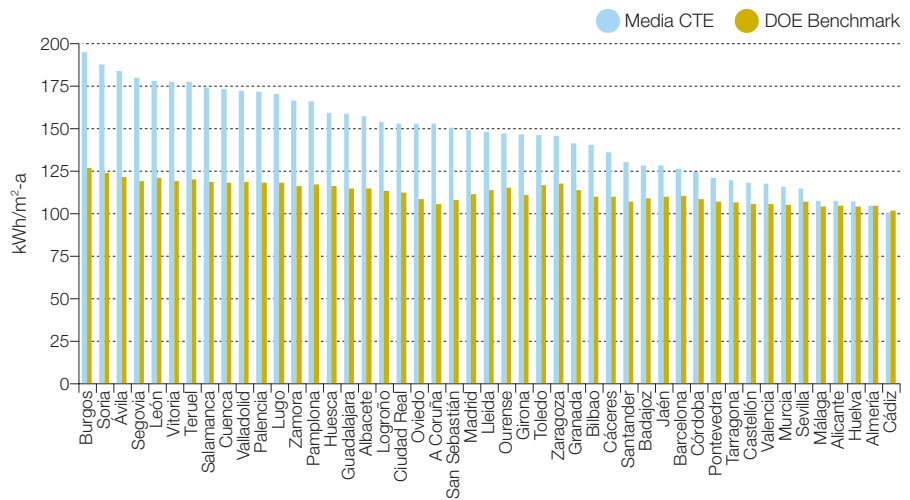
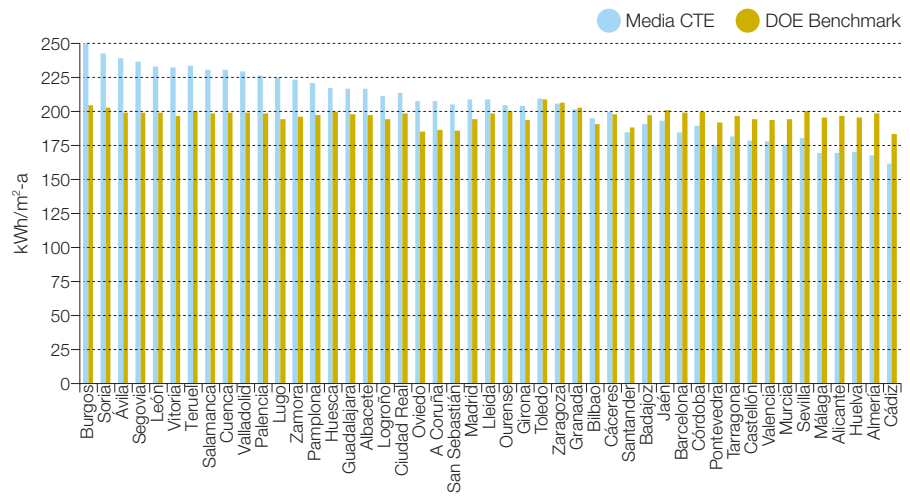


Figura 275. Comparativa de consumo de energía primaria total entre la media de los edificios construidos según CTE y el DOE Benchmark (bloque de pisos).



Si en lugar de comparar con la primera aproximación del BAU 2050 desarrollada en el capítulo de análisis de la calificación energética, comparamos el DOE Benchmark con la media⁵⁸⁷ de los edificios actualmente cons-

truidos cumpliendo el CTE, obtenemos los resultados en términos de energía final y energía primaria recogidos en las figuras

Figura 276. Comparativa de electrificación entre la media de los edificios construidos según CTE y el DOE Benchmark (bloque de pisos).

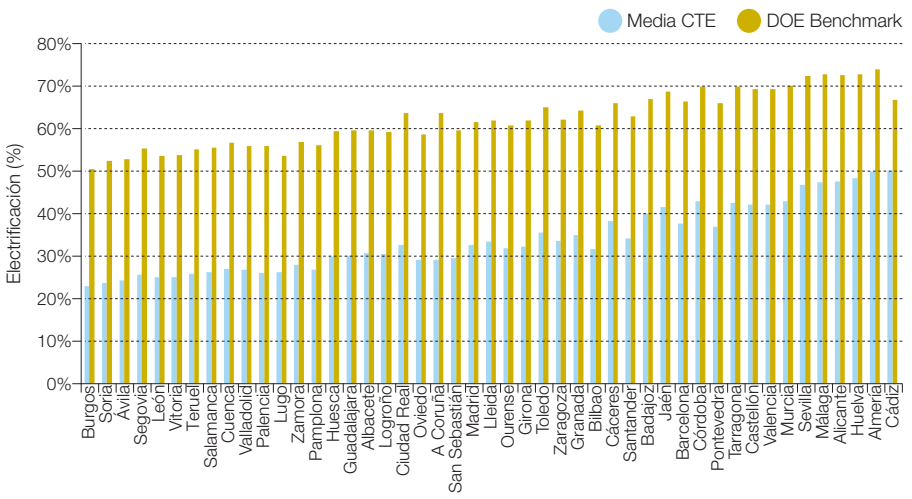
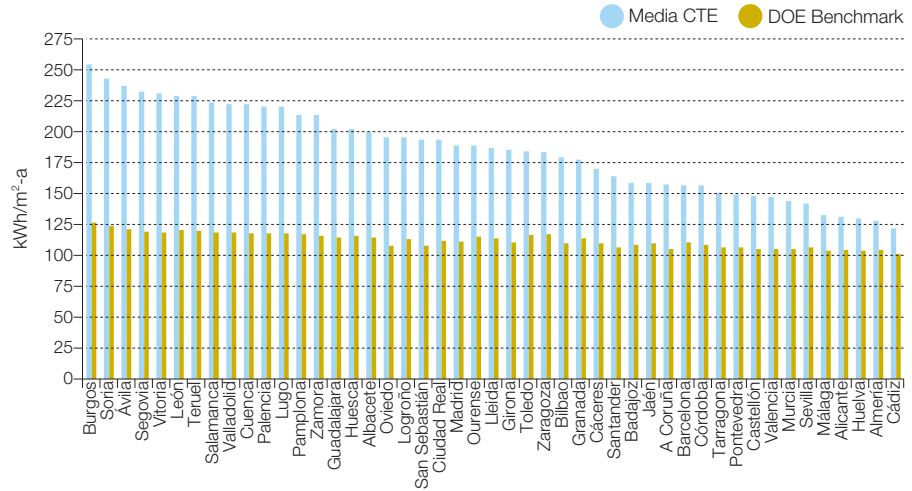


Figura 277. Comparativa de consumo de energía final total entre la media de los edificios construidos según CTE (vivienda unifamiliar) y el DOE Benchmark.



587 Más concretamente el percentil 50º de la muestra de edificios analizados (todos ellos cumpliendo estrictamente el CTE) de cara al desarrollo de la escala de calificación energética.

274 a 276, donde podemos confirmar las conclusiones anteriormente extraídas en relación a la exigencia de la regulación en España y EE. UU.

Pero en el caso de los edificios unifamiliares, el CTE todavía permite mayores consumos energéticos. Las figuras 277 y 278 nos muestran la comparativa entre el DOE Benchmark

Figura 278. Comparativa de consumo de energía primaria total entre la media de los edificios construidos según CTE (vivienda unifamiliar) y el DOE Benchmark.

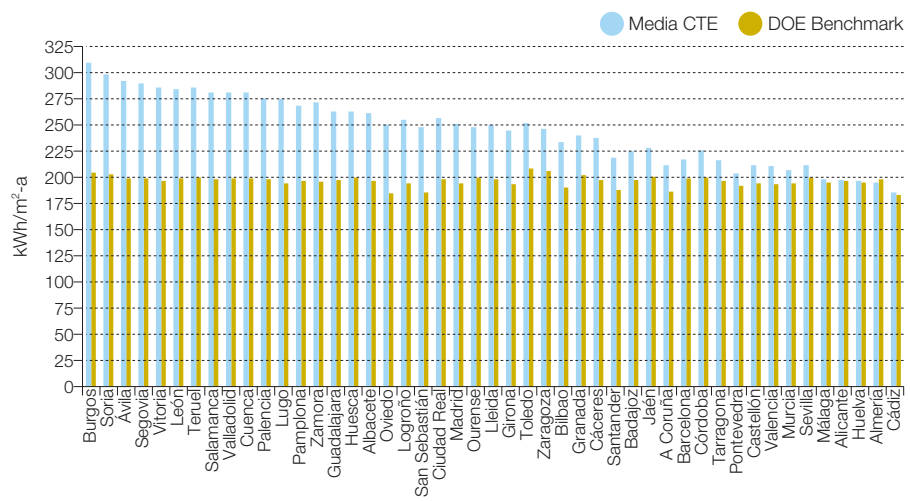
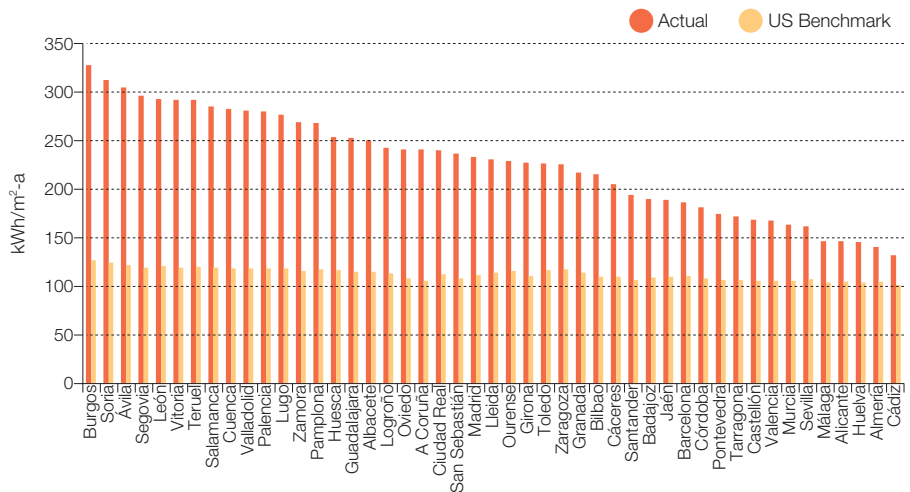


Figura 279. Comparativa de consumo de energía final total entre la caracterización del parque actual de edificios en España y el DOE Benchmark (bloque de pisos).



y la media de los edificios unifamiliares cons-
truidos cumpliendo rigurosamente el CTE.

Por último, presentamos la comparación
entre el DOE Benchmark y la caracterización

que desarrollamos anteriormente del estado
actual del parque de edificios residencial. Las
figuras 279 a 281 nos muestran la compara-
tiva en términos de energía final y primaria.
Como podemos observar, el DOE Benchmark,

Figura 280. Comparativa de consumo de energía primaria total entre la caracterización del parque actual de edificios en España y el DOE Benchmark (bloque de pisos).

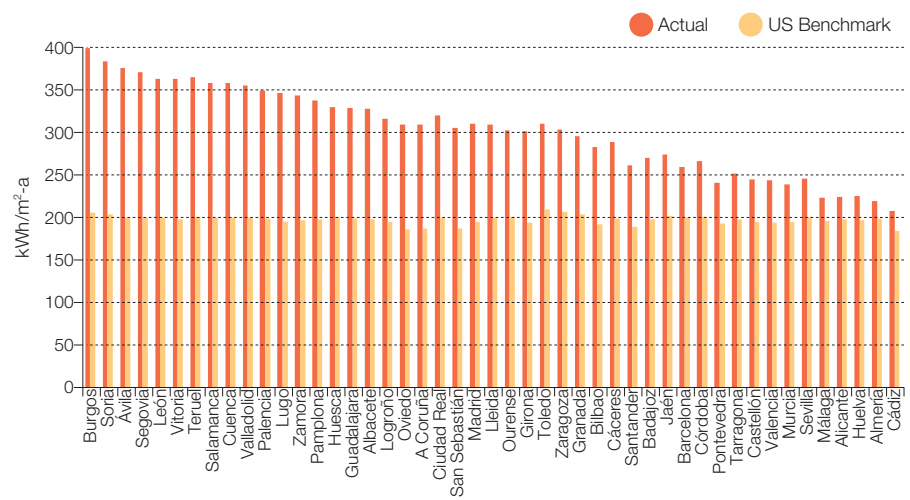
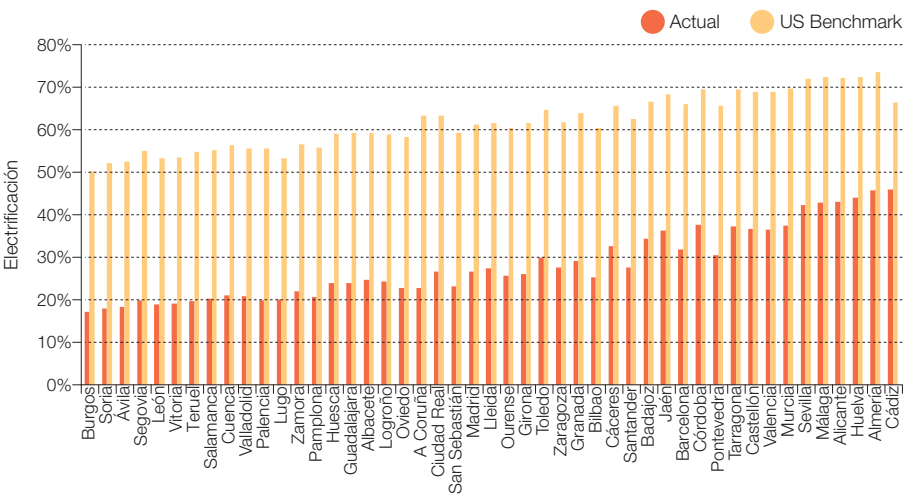


Figura 281. Comparativa de electrificación entre la caracterización del parque actual de edificios en España y el DOE Benchmark (bloque de pisos).



asumido como BAU 2050 para este estudio, representa una gran mejora de las prestaciones energéticas del parque de edificios existente.

3.7.2 Planteamiento del desarrollo de escenarios para el sector edificación

El desarrollo de escenarios BAU y E3.0 para el año 2050 en el sector edificación consta de las siguientes fases:

- Desarrollo de un escenario de superficie edificada, residencial y terciaria, a nivel provincial, que consideraremos común para los contextos BAU y E3.0.
- Desarrollo de un reparto modal entre las distintas tipologías de edificios, a nivel provincial, que también consideraremos común en los contextos BAU y E3.0.
- Desarrollo de un modelo de edificio para representar cada tipología del reparto modal asumido.
- Establecimiento de condiciones BAU y E3.0 para los niveles de eficiencia en cada una de las tipologías de edificio considerada.
- Simulación del modelo de cada tipología de edificio, en condiciones BAU y E3.0 de eficiencia, para cada una de las provincias⁵⁸⁸ peninsulares.

Según estos resultados se genera tanto la demanda modal y agregada anual del sector edificación, como su distribución estacional y horaria.

En el caso del modo de edificio residencial unifamiliar, y dadas las limitaciones de tiempo asociadas al alcance de este trabajo, se han realizado estudios paramétricos para definir

valores óptimos a nivel provincial de distintos parámetros tecnológicos que posteriormente se han extrapolado al resto de las tipologías de edificios.

Por lo que respecta al escenario BAU, como hemos mencionado en el punto anterior, hemos adoptado como representativo de la media del parque de edificios las condiciones de exigencia de la normativa de EE. UU. para el año 2004 (std 90.1-2004).

En el caso del escenario E3.0 se han introducido mejoras tecnológicas de los distintos componentes de demanda energética en línea con la evolución tecnológica prevista, y siempre con un enfoque conservador originado, por un lado, por el planteamiento de intentar acotar el alcance de las mejoras a lo que hoy podemos considerar como tecnológicamente alcanzable, y por el otro lado, por la limitación tanto de tiempo⁵⁸⁹ como de capacidad de modelado de la herramienta de simulación empleada para implementar distintas medidas de eficiencia. Por tanto, podemos afirmar que el potencial de ahorro que muestra el escenario E3.0 aquí desarrollado es conservador, y que con una buena práctica de la ingeniería bioclimática y de sostenibilidad aplicada al desarrollo de cada uno de los nuevos edificios que desarrollaremos a partir de ahora, y una mayor incidencia del urbanismo bioclimático, se podrían alcanzar mayores niveles de eficiencia en el contexto E3.0 para el año 2050 que los recogidos en este trabajo.

Con todo, es de resaltar que el nivel de ahorro alcanzado prácticamente en todas las tipologías de edificios analizadas, en términos de consumo de energía total final, ronda el 80% sin considerar aportaciones locales con renovables, mientras que la mayoría de estudios publicados hasta la fecha, con un enfoque que parecido al nuestro pero con horizontes

⁵⁸⁸ Puesto que la tendencia demográfica principal es a la urbanización, hemos considerado las capitales de provincia como emplazamientos representativos de la mayoría de la superficie edificada en cada provincia.

⁵⁸⁹ En este sentido podemos apuntar, por ejemplo, que se ha invertido un esfuerzo relativamente limitado para llevar las medidas pasivas a nivel de edificio hasta sus límites potenciales, dado el mayor esfuerzo de modelado que ello requiere y la gran cantidad de simulaciones a realizar. De igual modo, y tanto por representar de forma conservadora el conjunto del parque de edificios, como por limitaciones en el tiempo de modelado, no se ha asumido el despliegue, a gran escala, de planteamientos de urbanismo bioclimático que optimizaran la tipología y la orientación de los edificios en los distintos emplazamientos climáticos, mediante una ordenación de territorio y planificación urbanística con criterios de eficiencia energética (debe tenerse en cuenta además que las planificaciones urbanísticas actualmente vigentes, junto a las planificaciones del pasado, condicionarán gran parte de la edificación que formará el parque de edificios en el año 2050).

temporales más cercanos, muestran la viabilidad de alcanzar niveles de ahorro del 30% o el 50%.

Sin duda, de cara al año 2050 es posible alcanzar niveles de ahorro superiores al 80% aquí planteado, pero la estructura del consumo energético de los edificios en el contexto E3.0, fuertemente dominada por el consumo de los equipamientos, junto con la tendencia creciente a la incorporación de equipamientos en los edificios, nos indica que el potencial de mejora adicional quedará muy vinculado a la mejora de eficiencia en los equipamientos, y que de cualquier forma, no podrá alcanzar el 100%.

En este sentido, resulta interesante apuntar que los contextos en los que se mencionan planteamientos que inducen a pensar en la posibilidad de un ahorro del orden del 100%, difieren significativamente del contexto en el que nosotros hablamos de un ahorro del 80%. En efecto, o bien se trata de ahorros sobre tan solo algunas de las componentes de la demanda (parte de la demanda regulada) que siempre excluyen la demanda de equipamientos, o bien se trata del concepto de consumo *neto* cero, en el cual se contabiliza como consumo negativo la generación local con energías renovables. Si en cualquiera de estos dos casos nos limitáramos al consumo de energía, e incorporáramos todas las componentes de consumo, veríamos que los niveles de eficiencia implícitos son considerablemente inferiores al 100%.

En nuestro caso, en el contexto E3.0, el excedente de demanda de los edificios (ese 20%) es cubierto al 100% con energías renovables, pero sin la limitación artificial de pretender cubrir ese consumo con generación local. Sin duda, que dados los bajos niveles de consumo residual sería posible cubrirlo con

generación renovable local, pero en la mayoría de las ocasiones esta opción resultará menos eficiente desde el punto de vista de uso de recursos y del conjunto del sistema energético, que una solución basada en la integración del sistema energético mediante una red inteligente que abre la puerta a la participación de la gestión de la demanda a todos los elementos del sistema energético.

3.7.3 Escenario superficie edificios

Como hemos comentado más arriba, los escenarios de superficie de edificios se van a considerar idénticos⁵⁹⁰ en los contextos BAU y E3.0.

En la bibliografía se encuentran distintas correlaciones entre el área de edificación residencial y el PIB, sin embargo ninguna parece ajustarse a la tendencia que en principio podríamos esperar que se desarrollase en España de cara al futuro. En la figura 282 mostramos tres correlaciones de este estilo. La correlación-1 es la correspondiente a (Morna Isaac, Detlef P. van Vuuren, 2009), la correlación-2 es la presentada en (F. Rong, L. Clarke, S. Smith, 2007), y la correlación-3 es la que proponemos nosotros para España. Por tanto, de acuerdo con el escenario de evolución del PIB, para el año 2050 podríamos esperar un área útil de edificación residencial de 65 m²/p. La figura 283 nos proporciona la evolución del área de edificios residenciales al emplear esta correlación junto con los escenarios de población y de PIB anteriormente desarrollados. Es de resaltar que con el escenario poblacional adoptado, el máximo del área útil de edificios residenciales se obtiene al final del escenario.

Con la distribución provincial asumida para la población, en el año 2050 tendríamos el

590 Esta hipótesis conservadora va en línea con el planteamiento general de considerar para los contextos BAU y E3.0 la misma demanda de servicios. Evidentemente podría plantearse como medida adicional para el contexto E3.0 la reducción de la superficie del parque de edificios, lo cual podría alcanzarse tanto por una reducción de la superficie empleada per cápita, como por la combinación de funciones de los edificios que facilitan el despliegue de inteligencia por los sistemas técnico, social y económico (por ejemplo la reducción de superficie de oficinas al poder desarrollar la labor profesional mayoritariamente desde la vivienda mediante planteamientos de teletrabajo), en cuyo caso los consumos energéticos del contexto E3.0 serían inferiores a los planteados en este estudio. Pero puesto que estos cambios requieren en gran medida cambios de actitud de la gente, de forma conservadora hemos preferido excluirlas del alcance del contexto E3.0 aquí planteado, y evitar así que se genere la incertidumbre de cuánto del potencial de eficiencia mostrado lleva implícito un cambio de actitud fundamental sobre el que podemos tener poca certeza. Sin embargo, estos cambios de actitud facilitarían tremendamente la transición hacia un contexto E3.0.

reparto provincial del área útil de edificación residencial que mostramos en la figura 284. La superficie construida total del parque residencial en 2050 ascenderá, según este escenario a 3.894 km², lo que representa una tasa media de crecimiento desde el año 2010 del 0,8%/a.

Por lo que respecta a los edificios comerciales, en (F. Rong, L. Clarke, S. Smith, 2007) encontramos un escenario de evolución del ratio entre edificios comerciales y residenciales, que para EE. UU. se sitúa en torno al 32% para el año 2050.

Figura 282. Distintas correlaciones entre el área útil de edificación residencial y el PIB.

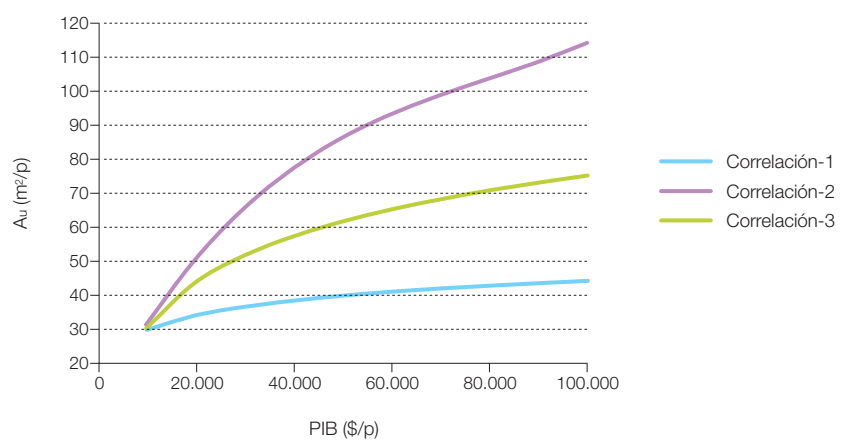


Figura 283. Evolución del área útil del parque de edificios residencial asociada a la correlación entre área útil per cápita y PIB, y los escenarios de población y PIB adoptados en este informe.

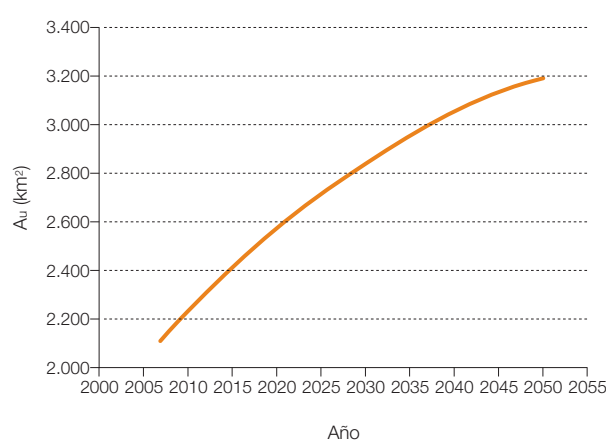
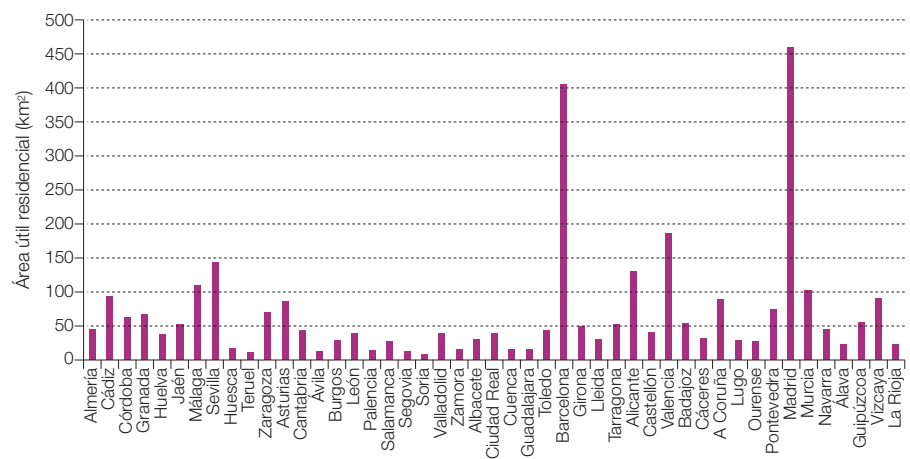


Figura 284. Reparto provincial de la superficie útil del parque de edificios residencial para el año 2050.



Recopilando la información histórica disponible en el Ministerio de Fomento sobre los visados de dirección de obra de los colegios de arquitectos técnicos (serie disponible 2000-2009) obtenemos la evolución mostrada en la figura 285, donde podemos apreciar el mayor

peso de la crisis del sector de la construcción sobre el sector residencial. El ratio de edificio terciario/residencial correspondiente a esta serie es el que podemos observar en la figura 286, donde podemos apreciar que debido a la crisis del sector construcción este ratio se

Figura 285. Evolución de las tasas de construcción en los sectores residencial y terciario según los datos del Ministerio de Fomento relativos a los visados de dirección de obra de los colegios de arquitectos técnicos.



ha disparado en los últimos años a valores muy superiores a los anteriores al la crisis, por lo que los ratios actuales no los podemos considerar como representativos, y de hecho parece que en España el ratio tendencial que cabría esperar al volver a la “normalidad”⁵⁹¹ de este sector, podría situarse significativamente por debajo del 32% proyectado para el año 2050 en los EE. UU.

Repitiendo este ejercicio con los datos correspondientes a las distintas CCAA y recopilando los valores del ratio entre las áreas construidas de edificación terciaria y residencial en las condiciones precrisis, obtenemos los resultados de la figura 287, en la que también mostramos los resultados del procesado histórico de la superficie acumulada de edificios hasta el año 2003 desarrollado en (GP, R2050, 2005). Según vemos en esta figura, los datos de la serie de construcción de los últimos diez años, antes del inicio de la crisis, parece estar decantada hacia un exceso de construcción residencial que no representa las condiciones del parque de total de edificios,

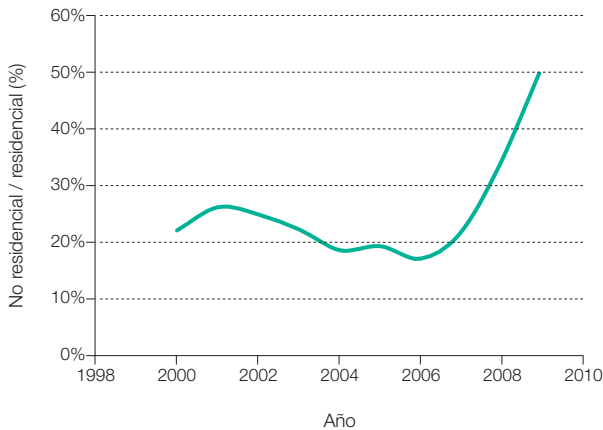
y la tasa terciario/residencial del total del parque construido en el año 2003 se sitúa más cerca de ese valor del 32% del escenario de EE. UU. para el año 2050, aunque se aprecia una cierta discriminación por CCAA.

Extendiendo el procesado realizado en (GP, R2050, 2005) a nivel de CCAA para incorporar los datos de construcción en los últimos años, obtenemos la evolución por CCAA del ratio de superficie terciaria a residencial recogido en la figura 288.

Proyectando estos ratios hacia el año 2050, teniendo en cuenta una estabilización poscrisis y una cierta convergencia entre el modelo de urbanización en las capitales de las distintas provincias, obtenemos los resultados finalmente adoptados para el año 2050 que presentamos en la figura 289.

Según estos resultados, el área útil del parque de edificios terciarios en el año 2050 asciende a 1027 km², con un crecimiento medio desde el año 2010 del 1,1%/a, mientras que para el

Figura 286. Evolución del ratio de superficie terciaria a residencial según los datos del Ministerio de Fomento relativos a los visados de dirección de obra de los colegios de arquitectos técnicos.



591 Sin embargo, es preciso tener presente que la situación de los últimos años, previos al desencadenamiento de la crisis inmobiliaria, no la podemos considerar ni mucho menos normal.

Figura 287. Ratio de superficie construida terciaria a residencial representativo de las condiciones precrisis según los datos del Ministerio de Fomento relativos a los visados de dirección de obra de los colegios de arquitectos técnicos (construcción 2000-2009) y acumulado procesado en (GP, R2050, 2006) para el año 2003.

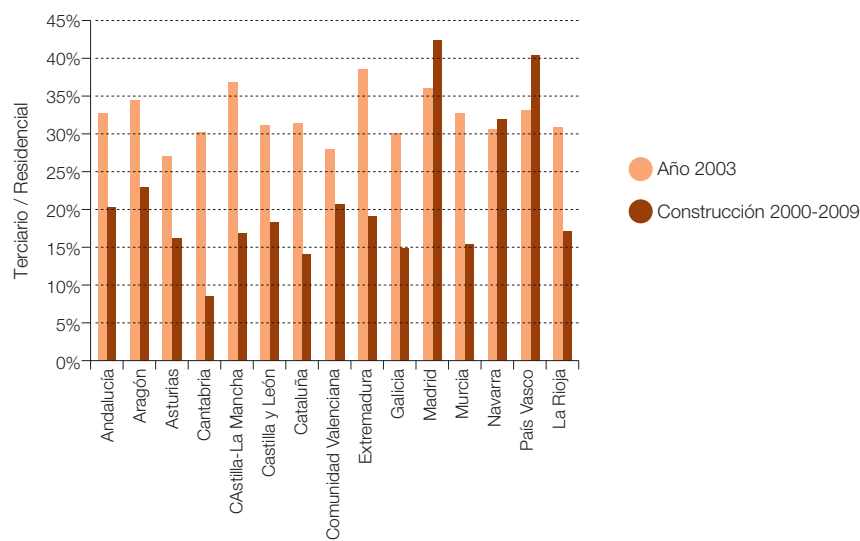
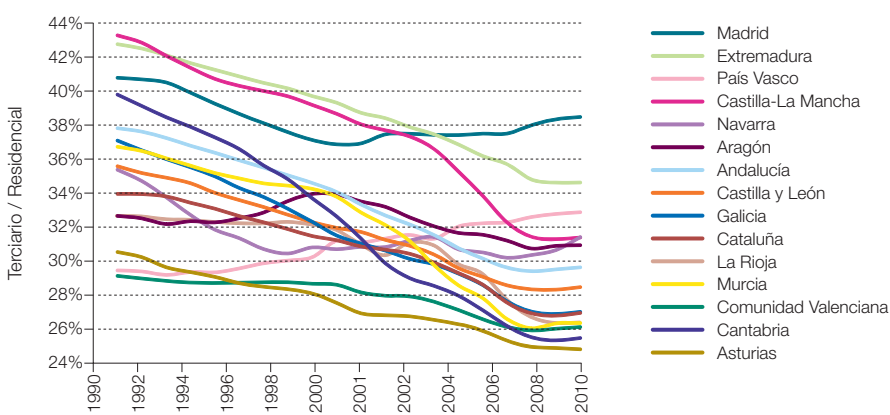


Figura 288. Evolución del ratio de superficie acumulada terciario a residencial.



sector residencial el área total útil en el año 2050 asciende a 3.192 km² con un crecimiento medio desde el año 2010 del 0,8%/a⁵⁹². La figura 290 recoge la distribución

provincial de área útil de edificios terciarios del parque de edificios en el año 2050 para complementar la anteriormente presentada del sector residencial.

Figura 289. Ratio de la construcción acumulada terciaria a la residencial para el año 2050.

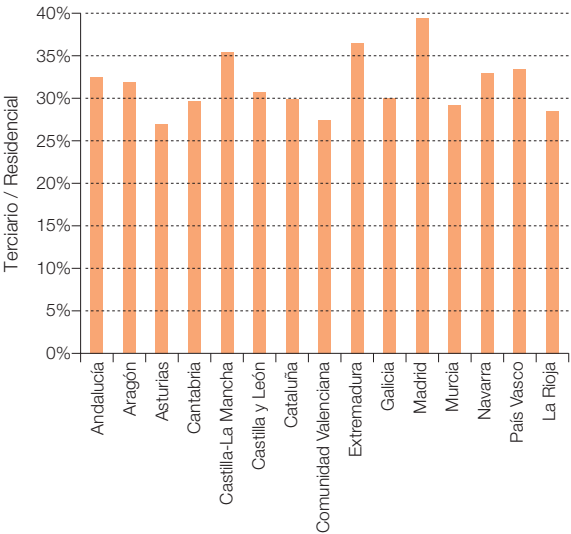
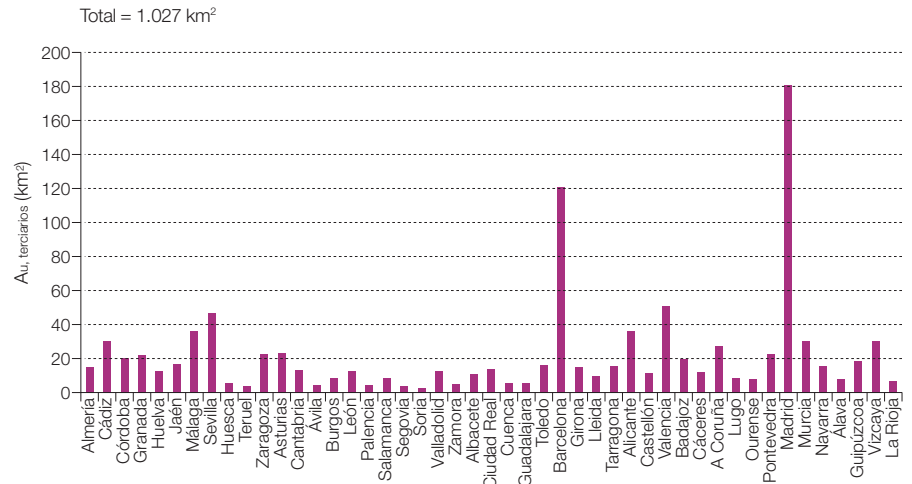


Figura 290. Distribución provincial del área útil del parque de edificios terciarios en el año 2050.



592 Como referencia, los crecimientos anuales medios en el periodo 1991-2010 fueron del 3,8%/a y 2,2%/a para los sectores residencial y terciario respectivamente.

El desarrollo de este parque final de edificios desde el instante actual puede seguir diversas trayectorias, pero de acuerdo con la situación vivida en el sector construcción

durante los últimos años, cabe esperar que estas trayectorias se asemejen a lo reproducido en las figuras 291 y 292, en las que la serie 1991-2010 corresponde a los datos históricos.

Figura 291. Escenario de evolución de la superficie construida del parque de edificios residencial. La serie 1991-2010 son valores históricos.

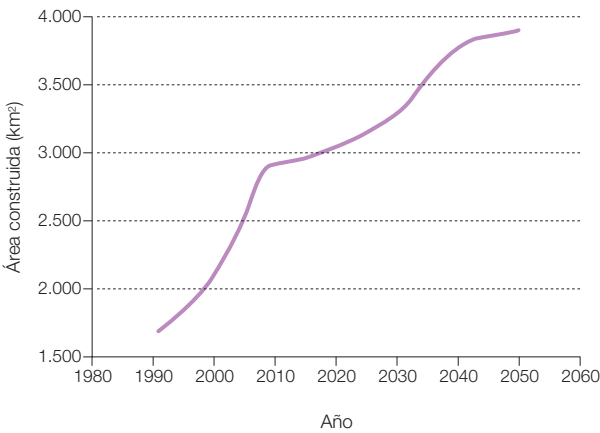
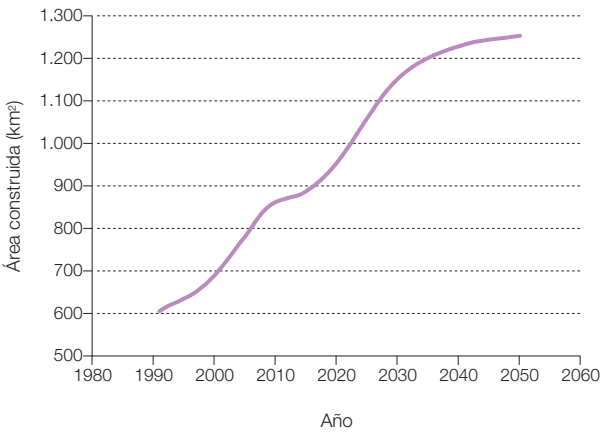


Figura 292. Escenario de evolución de la superficie construida del parque de edificios terciario. La serie 1991-2010 son valores históricos.



3.7.4 Tipologías edificios consideradas

De cara a describir el parque de edificios y su evolución, es preciso apoyarse en una serie de tipologías de edificios que representen correctamente la distribución modal del parque.

Cuantas más tipologías se recojan, mayor es el detalle y la precisión potencial a obtener con la caracterización del parque, pero es necesario buscar un compromiso entre el número de tipologías empleadas, el tiempo de cálculo requerido para simular los modelos de las distintas tipologías en los emplazamientos climáticos, y la cantidad de información disponible para caracterizar el reparto modal.

En nuestro caso, el nivel de caracterización del reparto modal del parque actual de edificios es extremadamente pobre, por lo que se refiere a los edificios no residenciales. Por tanto carece de sentido introducir un detalle excesivo en la tipología de edificios a emplear.

Sin embargo, hemos realizado un esfuerzo para retener las distintas características operativas del parque de edificios, tanto por lo que se refiere a horarios de operación, como por lo que se refiere a dotaciones de equipamientos empleadas en las distintas tipologías de edificios, motivo por el que hemos optado por introducir más tipologías de edificios de las que corresponderían al alcance de este estudio.

Por lo que se refiere a la discretización espacial, como ya hemos comentado anteriormente, el nivel de resolución empleado es el provincial, empleando los años meteorológicos tipo de las 47 capitales de provincia peninsulares para caracterizar los efectos de dispersión climática.

3.7.4.1 Tipologías seleccionadas para escenarios

Se han seleccionado las siguientes tipologías de edificios para caracterizar los parques de edificios BAU y E3.0:

- Sector residencial:
 1. Bloque de viviendas.
 2. Unidad de 3 viviendas adosadas.
- Sector terciario⁵⁹³:
 1. Oficina.
 2. Comercio.
 3. Supermercado.
 4. Centro educación.
 5. Hospital.
 6. Restaurante.
 7. Hotel.
 8. Almacén.

En capítulos anteriores hemos presentado la caracterización geométrica de estas tipologías de edificios.

3.7.4.2 Escenarios reparto modal

Por lo que se refiere al reparto modal de las tipologías de edificios, en el caso de los edificios de viviendas se encuentra bastante caracterizada por los datos disponibles en el INE y el Ministerio de Fomento. Sin embargo, por lo que se refiere a los edificios comerciales, la caracterización existente en España, a fechas de redacción de este informe, es más pobre y dispersa, por lo que el reparto modal propuesto tiene menor precisión.

En este contexto, vamos a desarrollar a partir de la información disponible y una serie de hipótesis adicionales una estimación del reparto modal actual, y adoptar la hipótesis adicional de que este reparto modal resulta

⁵⁹³ El sector de los edificios terciarios es lo que en otras referencias se denominan como edificios comerciales. Nosotros consideraremos estos dos términos como sinónimos, si bien por lo general nos referiremos a ellos como edificios terciarios por hacer explícito el hecho de que los modos de edificio que en nuestro país son mayoritariamente públicos (escuelas, hospitales, etc.) quedan incluidos en este término.

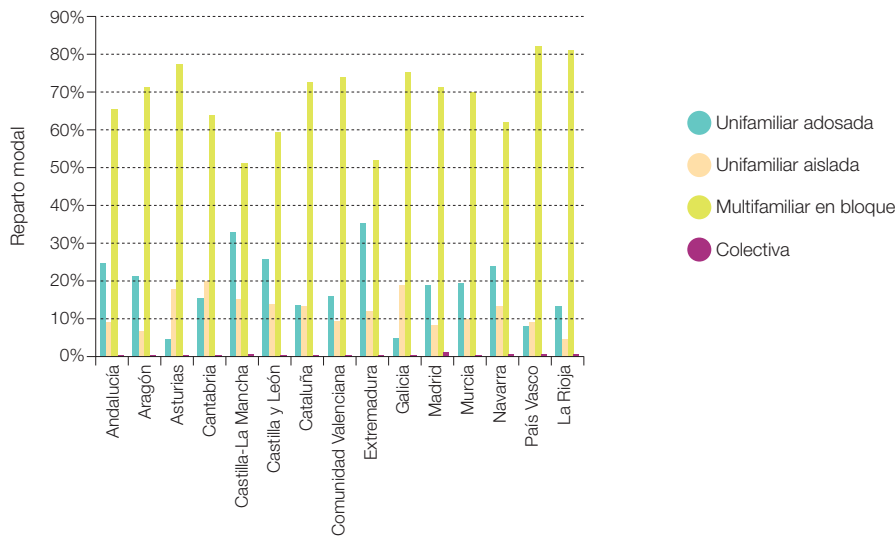
también representativo del que tendremos en el año 2050, tanto para el contexto BAU como para el E3.0.

Para el parque de edificios residencial, nos apoyaremos en los datos del Ministerio de Fomento que caracterizan los edificios construidos⁵⁹⁴ en el periodo 2000 a 2009. Dado el pico en la construcción de edificios residenciales durante estos años, consideramos que este reparto modal puede resultar representativo de las condiciones en el año 2050, pues gran parte de esta superficie realizada durante el boom de la construcción residencial nos va a acompañar hasta esas fechas. En la figura 293 mostramos el reparto modal de la superficie construida acumulada durante el periodo 2000-2009 por CCAA. De cara a la elección de tipologías de edificios, hemos juntado los modos unifamiliares adosados con unifamiliar

aislados para representarlos mediante una única tipología edificatoria, la unifamiliar adosada, que tal y como mostramos anteriormente apoyándonos en los datos recopilados por el INE resulta dominante.

Por lo que se refiere a los edificios terciarios, del procesado de los datos del Ministerio de Fomento que caracterizan los edificios construidos en el periodo 2000 a 2009 obtenemos el reparto modal por CCAA reflejado en la figura 294, mientras que la figura 295 nos muestra el resultado total para España. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurría con el sector residencial, este reparto modal no lo podemos considerar representativo ni del parque actual ni del parque para el año 2050 debido, por un lado, a la elevada vida de algunos modos de edificios terciarios, y por otro lado a la distorsión que ha supuesto el boom de

Figura 293. Reparto modal de la superficie residencial construida durante el periodo 2000-2009, que es el que consideramos representativo para el horizonte temporal de los escenarios aquí desarrollados.



594 Más precisamente los visados de dirección de obra de los colegios de arquitectos técnicos.

edificación residencial de los últimos 10 años. Además, las tipologías en las que aparecen agrupados los datos del Ministerio de Fomento no responden a las características de

consumo energético de los edificios, por lo que no se ajustan adecuadamente a las tipologías de edificios que hemos adoptado para representar el parque comercial.

Figura 294. Reparto modal de la superficie terciaria construida durante el periodo 2000-2009 por CCAA.

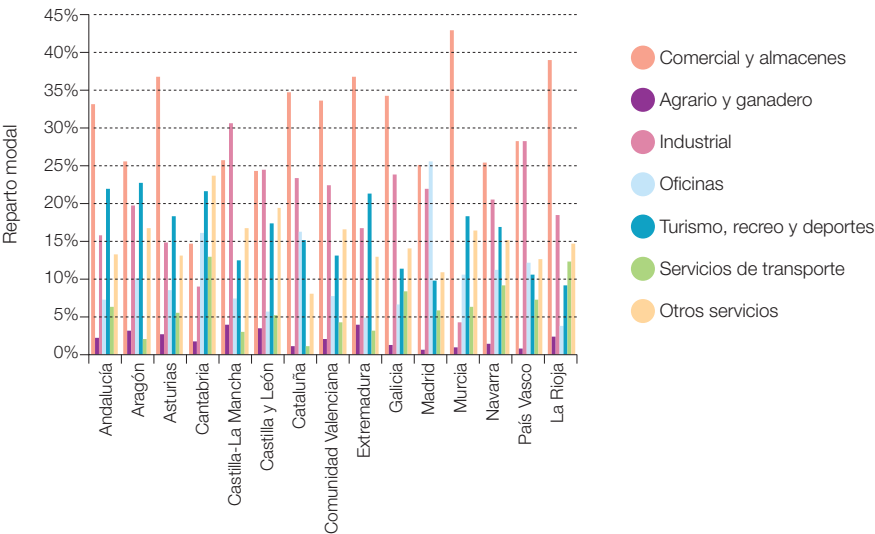


Figura 295. Reparto modal de la superficie terciaria construida durante el periodo 2000-2009 en España.

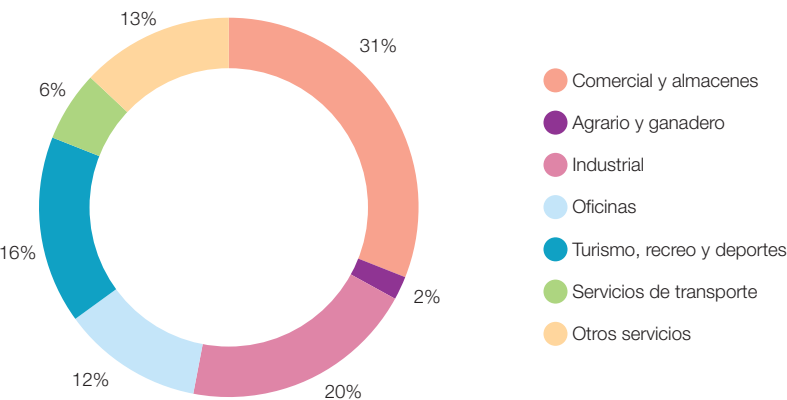
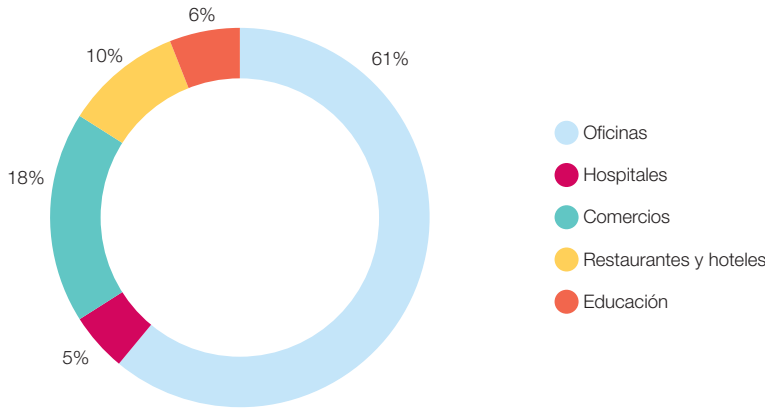


Figura 296. Reparto modal de la superficie comercial obtenido al procesar los valores de consumo energético indicados en la E4 con los consumos específicos correspondientes a las simulaciones con los edificios de referencia empleados en este informe.



En el documento sectorial de edificación de la E4 (MINECO, IDAE, 2003) aparece un reparto modal de los edificios terciarios basándose en su consumo energético. Desafortunadamente no figura en ese documento información asociada al reparto en términos de áreas ni de los consumos específicos de las correspondientes categorías de edificios. Con el fin de obtener a partir de estos datos una representación del reparto modal implícito, hemos empleado los consumos específicos de los edificios de referencia que hemos adoptado en este estudio, con el resultado que muestra la figura 296. El primer elemento que observamos en este reparto modal es la gran discrepancia con los resultados de la construcción acumulada en el periodo 2000-2009 que mostramos en la figura anterior. También sorprende el elevado peso de los edificios de oficina sobre el reparto modal, que no consideramos representativos de la situación real.

Otra fuente de información relevante son los repartos modales en EE. UU., que debido a la mayor calidad y exhaustividad de

la información recopilada periódicamente para caracterizar el parque de edificios comerciales⁵⁹⁵ nos puede proporcionar una indicación sobre la estructura que cabe esperar en este subsector de la edificación. En la figura 297 mostramos el reparto modal (reagrupado en las tipologías de edificios que nosotros vamos a usar) empleado junto a los DOE Benchmarks para caracterizar el parque de edificios comercial en EE. UU., y procedente de la encuesta realizada en 2003 por la AIE de EE. UU. (CBECS, 2003). Como podemos observar, este reparto modal, correspondiente al parque de edificios existente en EE. UU., difiere significativamente tanto del reparto modal de la construcción acumulada en España para el periodo 2000-2009, como de los datos que se desprenden de la E4, pero nos parece un reparto modal más consistente con las distintas tipologías de edificios consideradas.

Intentando mezclar toda esta información, elaboramos un escenario de reparto modal del sector terciario tomando como base a

⁵⁹⁵ En EE. UU. a este subsector se le denomina de edificios comerciales. Recordemos que en el marco de este informe es lo mismo que denominamos edificios terciarios.

Figura 297. Reparto modal del parque de edificios comercial en EE. UU. según la encuesta CBECS 2003 de la AIE. Este constituye también el reparto modal de los edificios terciarios adoptado para el conjunto de la España peninsular de cara al desarrollo de los escenarios (que posteriormente diferenciamos por CCAA de acuerdo con la actividad de construcción de los últimos 10 años).

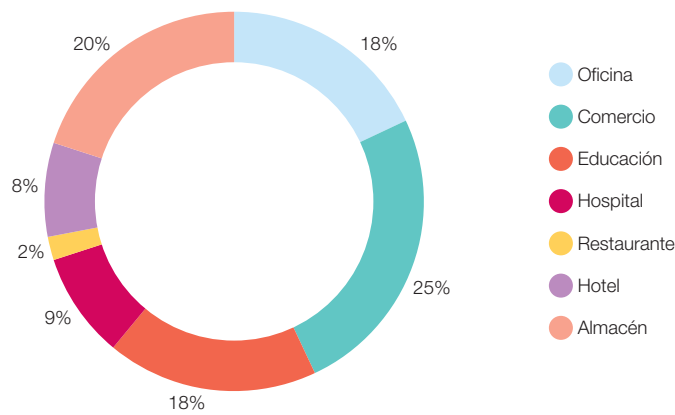
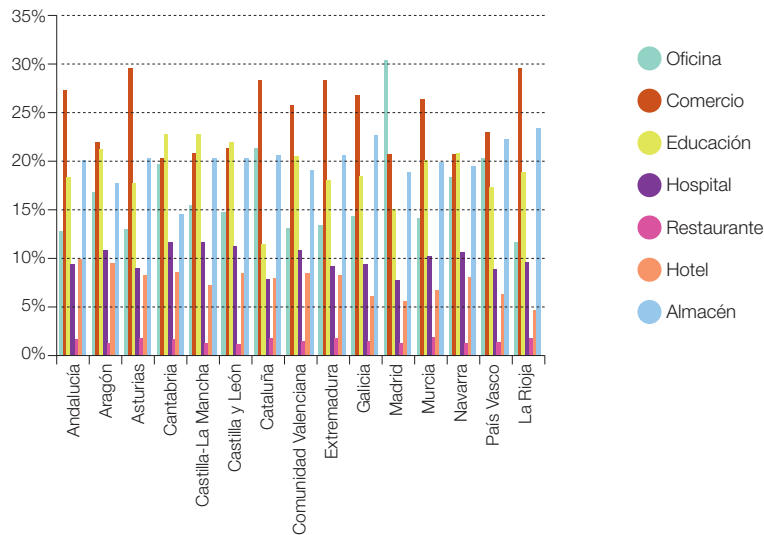


Figura 298. Reparto modal del parque de edificios comercial en España finalmente adoptado para el desarrollo de los escenarios, con su desglose a nivel CCAA.



nivel del total de la España peninsular el reparto modal EE. UU. (figura 297), y lo ponderamos para diferenciarlo a nivel CCAA principalmente de acuerdo con la información correspondiente a la construcción durante los últimos 10 años⁵⁹⁶. El resultado es el que mostramos en la figura 298 correspondiente al reparto modal diferenciado por CCAA.

3.7.5 Calibrado del consumo energético de los edificios

En este punto vamos a presentar los resultados de un ejercicio de calibrado de la estructura de consumo energético del sector edificación en la actualidad.

El calibrado es una práctica habitual del desarrollo de modelos en ingeniería con el fin de ajustarlos mejor a la realidad para posteriormente poder emplearlos en predecir cómo responderá el sistema modelado a la modificación de ciertos parámetros⁵⁹⁷. La idea fundamental es que al desarrollar un modelo físico de un sistema real, se formulen relaciones entre las distintas entradas y salidas de este sistema, que a su vez contienen una serie de parámetros internos del sistema. El modelo así formulado tiene, en principio, capacidad de reproducir la dependencia funcional entre las salidas y las entradas, pero tanto los parámetros internos que caracterizan al sistema como las entradas a que lo sometemos tienen una serie de incertidumbres que se propagan dentro del modelo para introducir un error en las salidas del modelo. Al calibrar el modelo, ajustamos valores tanto de parámetros internos como de las entradas para ajustar la salida del modelo a lo observado en la realidad⁵⁹⁸. Este proceso de calibrado, además de dejar el modelo “ajustado” para poder describir la realidad, puede a menudo emplearse para deducir el valor de ciertas entradas

o parámetros internos sobre los que exista incertidumbre: en el calibrado esta variable con incertidumbre se modifica para reproducir en el modelo la salida que nos proporciona el sistema real, y de esta forma podemos obtener información cuantitativa sobre el estado actual desea variable sometida a incertidumbre. En todo este planteamiento hay que tener además presente que la “realidad” se encuentra también sometida a incertidumbre, lo cual es especialmente cierto en el caso que nos ocupa.

En los términos que aquí nos ocupan, el “modelo” es el que hemos desarrollado para describir el sector edificación, y su “salida” principal es el consumo de energía del sector edificación. “Entradas” relevantes al modelo sobre las que existe un grado de incertidumbre significativo son, tanto la superficie total del parque edificatorio que realmente se está utilizando, como el reparto modal de esta superficie entre los distintos tipos de edificios. “Parámetros” importantes del modelo son las condiciones de uso reales de los edificios. La “realidad” con la que vamos a calibrar el modelo son los datos de consumo energético del sector edificación que aparecen en los balances de la AIE para el año 2007, y que, tal y como hemos comentado anteriormente, también se encuentran sometidos a una incertidumbre significativa. El proceso de calibrado nos permitirá extraer algunas conclusiones interesantes entre las “entradas”, “parámetros” y la “realidad”.

Como hemos comentado en los puntos anteriores, la información disponible en España para caracterizar la estructura energética del sector edificación es extremadamente limitada. De hecho, con la información disponible, podemos afirmar que en esencia desconocemos por completo la estructura energética de nuestro parque de edificios actual, lo cual constituye un muy mal punto de

596 Filtrándola en relación a aquellos aspectos que parecen apuntar más a un desfase en la construcción de ciertos modos de edificios que a la representatividad del parque regional.

597 El gran potencial de los modelos es el poder anticipar el futuro al predecir qué sucederá sobre las salidas del sistema si cambiamos una serie de entradas o parámetros, sin incurrir en los costes (de tiempo y económicos) ni los riesgos (piénsese por ejemplo en el sistema climático) de obtener esas respuestas vía experimentación, permitiendo el diseño y optimización de la mayoría de sistemas técnicos que nos rodean. Sin embargo hay que ser conscientes de las limitaciones de los modelos, tanto en lo que respecta a la calidad de su formulación, como a las incertidumbres en entradas y parámetros, para considerar en su contexto adecuado las descripciones de cómo podría desplegarse el futuro que nos proporcionan.

598 Sin embargo, debe tenerse en cuenta que lo habitual en los procesos de calibrado es que se tengan muchas más variables independientes que ecuaciones, por lo que el calibrado no puede resolver todas las incertidumbres asociadas a las variables del modelo. En este contexto, damos por buenas aquellas variables y parámetros sobre los que tengamos una menor incertidumbre, y empleamos el proceso de calibrado para caracterizar o obtener información adicional sobre aquellas variables que contengan mayor incertidumbre. Pero dado que el sistema original estaba indeterminado, estos resultados no los podemos considerar como una descripción completa de la “realidad”, sino más bien como una información cualitativa adicional sobre la misma, que de paso nos deja el modelo validado para usarlo en proyecciones del futuro.

partida para impulsar medidas de eficiencia orientadas a objetivos concretos⁵⁹⁹.

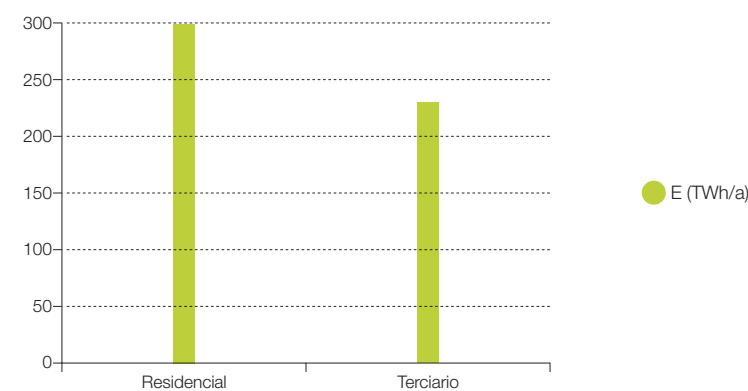
Para salvar este escollo, en el marco de este estudio hemos desarrollado un modelo que nos proporcione una estimación de la estructura energética del parque de edificios actual, que es el que luego hemos empleado para proyectar los escenarios BAU y E3.0 para el año 2050.

Por tanto, tiene interés⁶⁰⁰ analizar cómo com-para la estimación desarrollada del parque de edificios actual con los únicos datos macro de los que disponemos sobre la estructura ener-gética del sector edificación, que son los que aparecen en los balances de la AIE⁶⁰¹ y que constituyen nuestra aproximación a la “reali-dad” del sector edificación, para extraer con-clusiones tanto sobre las entradas y pará-metros del modelo, como sobre la “realidad” del este sector. Estos datos de los balances de la AIE que usaremos para caracterizar la “realidad” energética de este sector, a nues-tro entender están muy lejos de estar libres

de incertidumbres, tanto por su carácter tan macro, como por la carencia de datos sobre la estructura energética del sector edificación en España⁶⁰², y por las peculiaridades del sector edificación, tremendamente difuso tanto en lo que hace al uso de energía final como en lo que se refiere a las fuentes energéticas em-pleadas⁶⁰³. Adicionalmente está el tema ya co-mentado de la adaptación socioeconómica de las condiciones de confort, que hace que las condiciones de confort realmente fijadas en el parque de edificios puedan diferir significati-mente de las presupuestas⁶⁰⁴. Pero dado que este es el único dato energético abarcando al conjunto del sector edificación de que dispo-nemos, lo vamos a tomar como referencia in-dicativa del consumo energético real del sec-tor edificación y, mediante el calibrado del modelo con esta “realidad”, extraer conclusio-nes sobre algunas de las entradas y paráme-tros del modelo.

Por tanto hemos desarrollado un proceso de calibrado de nuestro modelo de la estructura energética del parque de edificios, con los

Figura 299. Consumos de energía primaria del sector edificación en España, separados entre edificios residenciales y terciarios, según los datos del balance de la AIE para el año 2007.



599 En efecto, ante cualquier planificación de introducir medidas de eficiencia, las preguntas fundamentales que quedan en el aire son: ¿ahorro respecto a qué?, ¿en qué nivel de consumo nos sitúa la implementación de la medida de eficiencia? Hasta que tengamos correctamente caracterizado el parque de edificios actual resulta imposible establecer planificaciones orientadas a objetivos concretos, que son las que necesitamos.

600 Este interés es exclusivamente por lo que se refiere a extraer algunas conclusiones sobre la estructura energética actual del sector edificación (dada la indeterminación de la misma que tenemos), pero no afecta al objetivo final de este estudio que es el elaborar un escenario para el año 2050. En efecto, las incertidumbres asociadas a la descripción de la estructura actual del sector edificación (instante de inicio del escenario) se van diluyendo a lo largo del escenario, tanto por la internalización de elementos como las demandas de confort y uso, como por la desvinculación de la caracterización “oficial” de la “realidad” actual, como por la convergencia con las hipótesis que describen la configuración del escenario. Es decir, al final el escenario describe cómo se puede desplegar el futuro según unas hipótesis de partida, y como visión particular de la posible realidad del futuro según estas hipótesis, el escenario se desliza de la coyuntura de la situación actual.

601 Los datos empleados para esta calibración han sido los que aparecen en el balance de la AIE del año 2007, que son los que estaban disponibles en la web de la AIE a la fecha de la elaboración de este trabajo (de hecho, en 9/2010, esos siguen siendo los datos disponibles en la web de la AIE).

602 Que deben formar la base de los datos que aparecen en los balances de la AIE.

603 El sector transporte también es difuso en el uso final de la energía, pero las formas de energía empleadas se encuentran mucho más centralizadas en su producción y distribución, por lo que en principio a nivel macro debería ser mucho más sencillo disponer de una buena evaluación de su consumo energético (aunque como hemos visto en el calibrado del modelo del sector transporte esta situación no parece corresponderse con la realidad).

604 Que son las que se encuentran en la base de las estimaciones energéticas en las que se

datos agregados de consumo del sector que aparecen en los balances de la AIE. El interés de este proceso de calibrado reside en que, por un lado, nos proporciona una primera estimación de la bondad de nuestro modelo⁶⁰⁵ y, por otro lado, nos proporciona indicaciones de qué puede estar sucediendo realmente en el sector edificación actual.

En la figura 299 recogemos los valores de consumo energético del sector edificación, en términos de energía primaria, según se deducen del balance de la AIE para el año 2007, diferenciando entre edificios residenciales y terciarios.

El ejercicio de calibrado va a consistir en lo siguiente: tomando como objetivos los valores de consumo energético que figuran en el balance de energía de la AIE, modificaremos una serie de parámetros⁶⁰⁶ dentro de nuestro modelo de estructura energética del sector edificación actual, hasta conseguir que la previsión de consumo que proporciona nuestro modelo coincida con la indicada en el balance de la AIE.

Como modelo de la estructura energética actual del sector edificación debemos entender tanto la distribución provincial de consumos específicos de los distintos edificios, como el reparto modal entre los distintos tipos de edificios y el valor total de la superficie edificada y en uso. Para la superficie total edificada y en uso (así como su distribución provincial) tomaremos los valores presentados en los puntos anteriores, al igual que para el reparto modal entre los distintos tipos de edificios. Para la estructura de consumos específicos de cada tipología de edificio tomaremos para los modos residenciales la aproximación obtenida en el punto dedicado al análisis de los niveles de referencia de consumo que proporciona la calificación energética de edificios. Para el resto de tipologías de edificios que configuran el conjunto de edificios terciarios,

emplearemos, como base de consumos específicos que describen la situación del parque en el año 2007, los valores obtenidos a partir del escenario BAU (que hemos confeccionado a partir de la simulación de los edificios de referencia), modulados con unos coeficientes de degradación⁶⁰⁷ de la energía primaria regulada cuya distribución espacial procede del análisis desarrollado en el apartado dedicado a la certificación energética.

Como parámetros a modificar en el proceso de calibrado adoptaremos los tres siguientes:

- Porcentaje de edificios realmente en uso. Debido a las elevadas tasas de construcción experimentadas en España en los años anteriores a la última crisis, el parque de edificios actual se encuentra claramente sobredimensionado, de tal forma que una parte significativa de la superficie edificada no se encuentra realmente en uso y por tanto no consume energía.
- Coeficiente de ajuste por falta de confort y condiciones de uso. Este parámetro tiene en cuenta que las condiciones de confort y uso estándar no se encuentran completamente internalizadas, lo cual incluye el efecto, entre otros, de los aspectos de adaptación socioeconómicas de las condiciones de uso de los edificios⁶⁰⁸.
- Coeficiente de degradación de la energía primaria regulada respecto a la frontera D-E de la calificación energética de edificios. Tal y como discutimos al analizar la estructura de consumos específicos que se deduce de la calificación energética de edificios nuevos, en principio cabe esperar que si la regulación energética introducida en el año 2006 (CTE) representa una mejora respecto a la situación previamente existente del parque de edificios, aquellos componentes de la

apoya el modelo del parque de edificios desarrollado.

605 Más que de la bondad del modelo, realmente lo que evalúa es la bondad del modelo en relación a los datos de la AIE, dado que las fuentes de error en este caso pueden estar tanto en el modelo que hemos desarrollado nosotros como en los datos de la AIE, que por su carácter tan macro pueden contener importantes errores, especialmente para el sector edificación con su carácter difuso incluso por las fuentes energéticas empleadas.

606 Tal y como indicábamos anteriormente, el número de variables, con posible incertidumbre dentro del modelo, es superior al número de ecuaciones que obtenemos del proceso del calibrado. Por tanto, la manera de proceder consiste en dar por buenas aquellas variables que consideremos que tienen menor incertidumbre, o sobre las que no tenga tanto interés la información adicional que se pueda extraer, y centramos en el análisis de un menor número de variables que conviertan el problema en determinado. En este caso nos centraremos en las variables coeficiente de degradación y coeficiente de ajuste por falta de confort y uso como las más descriptivas de la caracterización de la estructura energética actual del sector edificación. Sin embargo, el hecho de que haya otras incertidumbres en la formulación hace que las conclusiones que obtengamos no puedan interpretarse como una descripción fidedigna y completa de la "realidad", sino más bien como una indicación de las tendencias subyacentes.

607 Los coeficientes de degradación los introdujimos en el capítulo dedicado al análisis de la información que se desprende de la certificación energética de edificios, y representan el cociente entre el consumo de energía regulada del parque de edificios actual y el consumo de energía regulada en unas condiciones de referencia definidas por la escala de certificación.

608 En este sentido conviene resaltar que las condiciones de uso real de cada uno de los edificios, difieren por lo general tanto de las presupuestas en los procesos de regulación y calificación energética oficiales, como las consideradas en nuestro modelo. El modelo debería describir las condiciones medias de uso de los edificios. Pero en la elaboración del modelo hemos supuesto que las demandas de servicios que hemos

demanda energética regulados⁶⁰⁹ deben ser mejores en los edificios construidos según el CTE que en el parque de edificios actual. Este hecho lo expresábamos mediante un coeficiente de degradación de la energía primaria regulada, cociente entre el consumo asociado a estos componentes de la demanda para el parque de edificios actual, y aquel correspondiente a la frontera⁶¹⁰ D-E de la calificación energética de edificios nuevos.

Puesto que disponemos de dos modelos, uno para el subsector residencial y otro para el subsector terciario, y dado que también disponemos de los datos “reales” del consumo agregado de estos dos subsectores (datos de los balances energéticos de la AIE para el año 2007), vamos a desarrollar dos procesos de calibrado, uno para el subsector residencial y otro para el terciario.

En primer lugar acometemos el calibrado del modelo del subsector residencial. En la figura 300 mostramos los resultados de tres calibrados distintos sobre el parque de edificios residenciales. En los tres casos se ha mantenido fijo el parámetro que representa el porcentaje de viviendas en uso, como un valor representativo de las viviendas principales y una cierta contribución de las secundarias⁶¹¹.

Para el calibrado-1 hemos empleado un valor del coeficiente de degradación del 135%, que es el que en primera aproximación supusimos al confeccionar el modelo de consumo energético específico del sector residencial de acuerdo con los resultados del procesado de la calificación energética de edificios nuevos. Este valor de coeficiente de degradación parecía adecuado dado que la degradación de los edificios residenciales nuevos, cumpliendo el CTE al pasar de la frontera C-D de la escala de calificación (percentil 40% de la muestra

analizada para el desarrollo de la escala) a la frontera D-E (percentil 95%), oscila entre 140% y 149% según las provincias, y dado que esperábamos que el parque de edificios actual fuera peor que los que se van a construir según el CTE. En estas condiciones, el proceso de calibrado nos proporciona un coeficiente de ajuste por falta de confort y uso del 63,4%, que realmente parece excesivamente bajo.

Este resultado nos indica que probablemente el coeficiente de degradación del parque actual originalmente supuesto sea excesivamente elevado.

En los calibrados 2 y 3 hemos supuesto para este coeficiente de degradación⁶¹² unos valores de 92% y 88%, obteniendo del proceso de calibrado unos coeficientes de ajuste por falta de confort y uso de 76,5% y 78,0% respectivamente.

Por tanto, podemos extraer las siguientes conclusiones sobre el proceso de calibrado⁶¹³ del modelo del parque de edificios residencial:

- Probablemente el CTE no represente una mejora significativa⁶¹⁴ respecto al parque de edificios actual. El ejercicio de calibrado aquí desarrollado apunta a que el parque de edificios residencial actual se encuentra dentro de la clase D de calificación energética, al igual que la mayoría de los edificios nuevos construidos según el CTE⁶¹⁵. Puesto que este resultado proviene del calibrado, tomando como descripción correcta de la realidad energética del sector los balances de la AIE, queda condicionado a la incertidumbre en la descripción de la realidad que proporcionan los balances de la AIE.
- La demanda de confort y uso de equipamiento no se encuentra completamente

considerado como demandas potenciales (climatización, iluminación, equipamientos, etc.) se encuentran totalmente internalizadas, mientras que la realidad actual puede ser distinta. De todos modos, más allá del ejercicio de calibrado que estamos desarrollando para el año 2007 (donde la internalización de la demanda de servicios puede no ser completa), el objetivo principal del modelo es proporcionar una descripción de la situación que cabe esperar en el año 2050, y para esas fechas la internalización completa de las demandas de servicios parece una hipótesis apropiada.

609 Respecto a los componentes de consumo no regulados, no se puede asumir una mejora de los edificios construidos según la regulación actual respecto a los del parque existente.

610 Conviene recordar que la gran mayoría de los edificios residenciales construidos según el CTE caen dentro de la clase D de la escala de calificación de edificios nuevos según el estudio realizado para desarrollar dicha escala de calificación.

611 Según el censo 2001 del INE, el porcentaje de viviendas principales corresponde a un 68,7%, el de secundarias a un 16,3% y el de vacías a un 15%. Hemos considerado que las viviendas secundarias contribuyen al consumo con un 20% de su consumo potencial.

612 A nivel de referencia, el coeficiente de “degradación” de la frontera C-D de la calificación energética respecto a la frontera D-E que estamos usando como referencia, oscila entre 62,5% y 66,7% en las distintas provincias. Nótese que en el caso de que el coeficiente de degradación resulte menor que el 100%, lo que está reflejando es una mejora del caso analizado respecto al de referencia.

613 Evidentemente, el modelo del sector edificación que hemos desarrollado contiene muchos más parámetros que los que hemos “ajustado” en el proceso de calibrado, y algunos de ellos pueden contener una incertidumbre significativa a la vista de la limitada caracterización del sector edificación en España, aunque para los edificios residenciales que son los involucrados en este calibrado las incertidumbres son menores que para los edificios terciarios. Por tanto, los resultados del calibrado hay que tomarlos más como una indicación de por dónde van las tendencias de la estructura energética actual del sector edificación que como la

internalizada en el parque de edificios actual. El ejercicio de calibrado aquí desarrollado apunta a que existe del orden de un 20-25%⁶¹⁶ de esta demanda que no se encuentra internalizada en la actualidad. Esta conclusión queda condicionada a la incertidumbre con que los balances de la AIE describen la realidad del sector edificación.

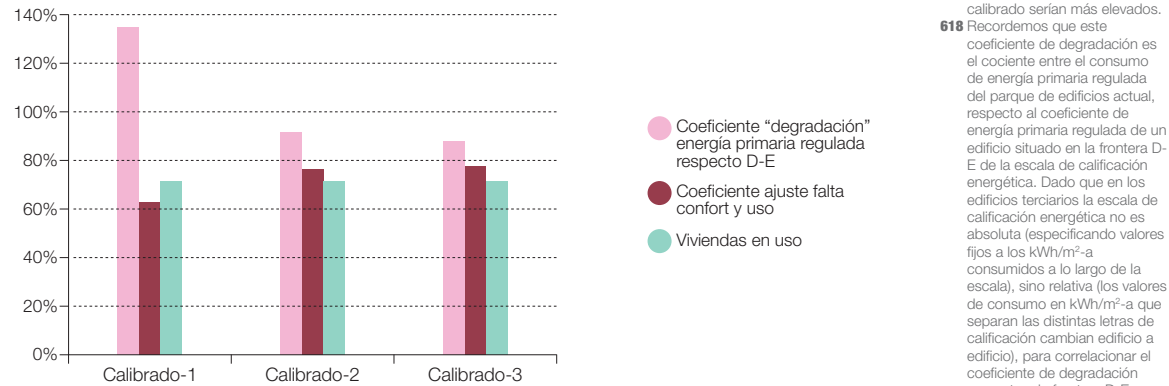
- Es posible que lo que hemos considerado como la “realidad” del consumo de energía del sector de edificación en el año 2007, es decir, los balances de la AIE, contengan un error por defecto significativo, es decir, que el consumo real de energía del sector edificación sea superior a los valores registrados por la AIE. Desde el punto de vista de cómo se confeccionan estos indicadores macro parece posible que exista este error por defecto, y los bajos valores obtenidos para los coeficientes de degradación y coeficiente de ajuste por falta de confort y uso también parecen apuntar en esta dirección⁶¹⁷.

A continuación desarrollamos el calibrado del modelo del subsector terciario. En la figura 301 mostramos los resultados de cuatro calibrados distintos sobre el parque de edificios

terciario. En principio, cabe esperar que en el parque de edificios terciario el porcentaje de edificios en uso sea más alto que en el parque residencial, por lo que en principio hemos asignado un valor del 95% a este parámetro. Por lo que respecta al coeficiente de ajuste por falta de confort y uso también cabe esperar que en los edificios terciarios sea muy superior al obtenido en los edificios residenciales, debido al hecho de que en este tipo de edificios hay mucho menos margen para la adaptación socioeconómica, pero en principio dejamos este parámetro libre para obtenerlo como resultado del proceso de calibrado.

Empezamos presuponiendo que la introducción del CTE supone una mejora respecto al parque de edificios existente, por lo que en el calibrado-1 asignamos un valor del 115% al coeficiente de degradación⁶¹⁸. Sin embargo, en estas condiciones obtenemos un valor extremadamente bajo (78,1%) para este tipo de edificios del coeficiente de ajuste por falta de confort y uso. Si reducimos en el calibrado-2 el coeficiente de degradación al 105% seguimos obteniendo un valor demasiado bajo (81,4%) del coeficiente de ajuste por falta de

Figura 300. Resultados de tres procesos de calibrado del parque de edificios residencial.



“verdad” definitiva (que por otro lado probablemente no exista...).

614 Sin perder de perspectiva las incertidumbres asociadas a otros parámetros del modelo o a la propia caracterización de la “realidad” mediante los balances de la AIE, cabe señalar que otros estudios basados en un enfoque totalmente distinto y mucho más sencillo apuntan en la misma dirección. En concreto, en (García-Casals X., 2004), (García-Casals X., 2005) y (García-Casals X., 2006-1) se documenta un análisis basado sencillamente en traducir los indicadores en los que se basa el CTE a los indicadores de la normativa anterior (NBE CT-79) para poder hacer una comparación directa entre ambas, concluyendo que para las tipologías de edificios de baja compactad (los de por sí menos eficientes) el CTE significa un empeoramiento significativo respecto a la NBE CT-79, mientras que para los edificios de elevada compactad el CTE representa una mejora más limitada (del orden de 1/3 del empeoramiento en los edificios poco compactos).

615 Tal y como se desprende de la “muestra” analizada para el desarrollo de la escala de calificación energética de edificios residenciales nuevos.

616 Como velamos anteriormente, para los calibrados 2 y 3 los coeficientes de ajuste por falta de confort y uso resultaban del 76,5% y 78% respectivamente, por lo que la demanda de servicios potenciales no cubierta era del 23,5% y el 22% respectivamente.

617 Si la “realidad” tuviera un consumo energético mayor que los reflejados en los balances de la AIE, los coeficientes de degradación y ajuste por falta de confort y uso que arrojaría el proceso de calibrado serían más elevados.

618 Recordemos que este coeficiente de degradación es el cociente entre el consumo de energía primaria regulada del parque de edificios actual, respecto al coeficiente de energía primaria regulada de un edificio situado en la frontera D-E de la escala de calificación energética. Dado que en los edificios terciarios la escala de calificación energética no es absoluta (especificando valores fijos a los kWh/m²-a consumidos a lo largo de la escala), sino relativa (los valores de consumo en kWh/m²-a que separan las distintas letras de calificación cambian edificio a edificio), para correlacionar el coeficiente de degradación respecto a la frontera D-E con

confort y uso, concluyendo que al igual de lo que sucedía con los edificios residenciales, el coeficiente de degradación deberá ser inferior al 100% en el parque de edificios terciarios.

En el calibrado-3, con un factor de edificios en uso del 90% (parece bajo para el parque terciario), al emplear un coeficiente de degradación del 85% obtenemos del proceso de calibrado un coeficiente de ajuste por falta de confort y uso del 93,8% que ya parece más apropiado para este tipo de edificios, si bien todavía un poco bajo.

En el calibrado-4, con un factor de edificios en uso del 95%, es preciso reducir el coeficiente de degradación hasta el 65% para obtener del proceso de calibrado un coeficiente de ajuste por falta de confort y uso del 97,9%, que parece más apropiado para este tipo de edificios.

De este proceso de calibrado del subsector terciario podemos extraer la siguiente conclusión⁶¹⁹:

- Para el parque de edificios terciario, los resultados del proceso de calibrado apuntan

de forma bastante consistente a que la introducción del CTE no representa una mejora sustancial⁶²⁰ respecto al parque de edificios existente, que parece situarse dentro de la categoría D de la escala de calificación de edificios nuevos. Esto se refleja por los coeficientes de degradación inferiores a la unidad⁶²¹ hacia los que apunta el proceso de calibrado. Puesto que este resultado proviene del calibrado y toma como descripción correcta de la realidad energética del sector los balances de la AIE, queda condicionado a la incertidumbre en la descripción de la realidad que proporcionan los balances de la AIE. En efecto, si el consumo del subsector terciario fuera superior al registrado por los balances de la AIE, el coeficiente de degradación que obtendríamos del proceso de calibrado sería más elevado.

El proceso de calibrado del modelo del sector edificación con la “realidad” en el año 2007, tal y como queda caracterizada por los balances de la AIE, nos ha permitido por un lado, obtener información cualitativa sobre la estructura energética actual del sector edificación, pero por otro lado, teniendo en cuenta la escasa información de partida disponible para

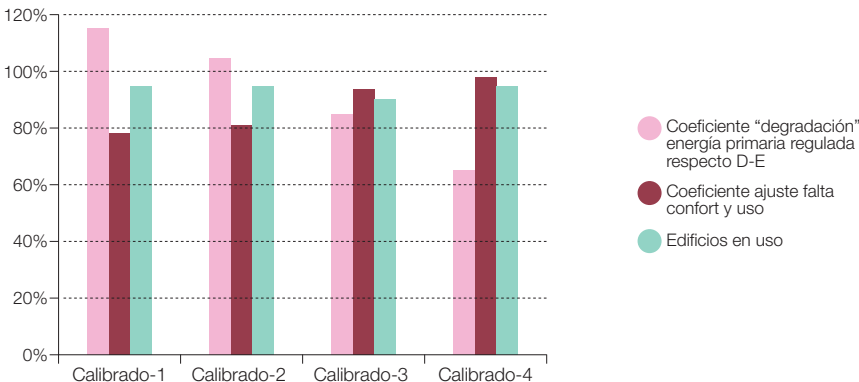
los coeficientes de degradación respecto al BAU 2050 nos hemos apoyado en el análisis desarrollado para la calificación energética de los edificios residenciales (para los cuales la escala de calificación sí que es absoluta, aunque dependiente de la zona climática). Este es otro de los múltiples inconvenientes del uso de escalas relativas tanto en la regulación (CTE) como en la calificación de edificios terciarios, y en esencia no es más que un reflejo de la ausencia de una caracterización energética orientada a objetivos, lo cual añade importantes incertidumbres sobre la estructura energética del sector edificación.

619 Evidentemente, el modelo del sector edificación que hemos desarrollado contiene muchos más parámetros que los que hemos “ajustado” en el proceso de calibrado, y algunos de ellos pueden contener una incertidumbre significativa a la vista de la limitada caracterización del sector edificación en España, lo cual es especialmente cierto para los edificios terciarios. Por tanto, los resultados del calibrado hay que tomarlos más como una indicación de por dónde van las tendencias de la estructura energética actual del sector edificación que como la “verdad” definitiva.

620 Otras referencias anteriores también apuntan en este sentido y se basan en una “traducción” de los indicadores del CTE al indicador empleado por la normativa anterior (NBE CT-79), bajo la cual se ha construido gran parte del parque actual, de tal forma que pudieran compararse directamente ambas normativas. Los resultados se encuentran documentados en (García-Casals X., 2004, 2005, 2006-1).

621 Cuyo significado es que el consumo de energía primaria regulada del parque de edificios actual es menor que el de la frontera D-E de la escala de calificación.

Figura 301. Resultados de cuatro procesos de calibrado del parque de edificios terciario.



la caracterización energética del parque de edificios actual, así como la incertidumbre en la caracterización de la “realidad” (balances AIE), consideramos que los resultados arrojados por el proceso de calibrado muestran una buena consistencia del modelo desarrollado para describir la estructura energética incluso del parque de edificios existente, lo cual da soporte a la proyección de escenarios que realizamos a partir de la situación actual para generar los contextos BAU y E3.0 en el año 2050.

En efecto, el objetivo del modelo que hemos desarrollado es el predecir las implicaciones de distintas hipótesis de entrada (tamaño de parque de edificios, condiciones de uso, tecnologías empleadas, etc.) sobre el consumo energético del sector edificación en el año 2050⁶²², tanto para un contexto BAU como para un contexto E3.0, y el grado de detalle del modelo desarrollado nos proporciona una gran solidez para correlacionar las distintas hipótesis de entrada con su implicación energética. Las incertidumbres asociadas a las variables de entrada y la caracterización de la “realidad” en el inicio del escenario, se van diluyendo a medida que evoluciona a lo largo del periodo de análisis, al distanciarse de la situación concreta actual, de tal forma que a partir de un cierto punto el modelo ya no se ve afectado por estas incertidumbres, y actúa, tan solo, como herramienta para correlacionar hipótesis sobre las variables de entrada y su implicación energética. De hecho, algunas de las fuentes de incertidumbre existentes en la caracterización actual del sector edificación, como el porcentaje de edificios en uso y el coeficiente de ajuste por falta de confort y uso, cabe esperar que se vayan internalizando a lo largo del periodo de tiempo considerado hasta el año 2050, a medida que vayamos poniendo en uso el exceso de superficie construida durante estos últimos años y de

que se vaya incorporando la cobertura de esas demandas potenciales de servicios.

A partir de este punto, vamos a centrarnos pues en el instante final del escenario (año 2050), aunque según la información generada proporcionemos alguna información de cómo podría desarrollarse la transición desde la situación actual.

3.7.6 Componentes de demanda energética y potencial de mejora

Recopilamos en este punto, la caracterización de los componentes básicos que determinarán la demanda energética de los edificios, con indicación de los niveles de eficiencia alcanzables tanto en los contextos BAU como en el E3.0.

La aplicación de medidas de eficiencia en el sector edificación, así como la evolución que cabe esperar del uso de la energía en los edificios, conduce a una modificación radical de la estructura de demanda de energía en este sector. En efecto, el predominio actual de demanda de energía para cubrir las necesidades de climatización, evoluciona hacia una situación en que dicha demanda pasa a ser minoritaria, y queda fuertemente dominado el consumo de energía de los edificios por la demanda de los equipamientos en ellos implementados. Incluso otros elementos de demanda de gran peso actual como la iluminación, se reducen gracias a las medidas de eficiencia de lámparas y luminarias, y a la incorporación de las opciones de iluminación natural y de inteligencia. Pero los equipamientos, con una tendencia creciente a la demanda de sus servicios, tiene una evolución del consumo de energía que en un contexto BAU podría resultar incluso creciente respecto a la situación actual, y en el contexto E3.0 su

622 De hecho, el objetivo de este estudio no es el de evaluar el proceso de transición desde la actualidad hasta el año 2050, sino el analizar las implicaciones que en el año 2050 adquiere el haber evolucionado por una senda BAU o por una eficiente. Sin embargo, a lo largo del informe proporcionamos como resultado secundario distintas opciones de cómo podría desarrollarse la transición desde la situación actual hasta el año 2050, pues de su análisis también se desprenden algunas conclusiones interesantes.

menor reducción de consumo respecto a otras componentes de demanda, a menudo les convierte en la componente dominante de la estructura de la demanda total. Por otro lado, si bien es cierto que en muchos equipamientos existe todavía un importante potencial de mejora de su eficiencia, dado que hasta la fecha las consideraciones de eficiencia energética no han resultado prioritarias en su diseño, en otros equipamientos de proceso (como los implementados en hospitales, restaurantes, lavanderías, etc.) el margen de mejora puede resultar bastante más limitado.

En un contexto en el cual la demanda de los edificios queda dominada por el consumo energético de los equipamientos en ellos instalados, aspectos como la inteligencia en la gestión de la operación de estos equipamientos⁶²³ y la posibilidad de actuar sobre ellos de forma inteligente, para potenciar la gestión de la demanda, pasa a ser un aspecto fundamental del enfoque E3.0. Y desde el punto de vista de elección de tecnologías y despliegue de infraestructuras energéticas, el hecho de que los equipamientos consuman electricidad y pasen a ser la componente dominante de la estructura energética, sin duda condiciona aspectos como la electrificación del resto de componentes de demanda.

Un punto que merece mención explícita es el tratamiento que hemos hecho de algunas de las medidas pasivas potencialmente aplicables para mejorar el comportamiento energético del edificio, por lo que concierne principalmente a la elección de la forma y orientación de los edificios. Estos aspectos de diseño, para un edificio particular, pueden tener un efecto importante sobre su demanda de energía, y de hecho constituyen habitualmente los primeros grados de libertad con los que hay que jugar para optimizar su comportamiento energético. Sin embargo, son aspectos que están muy

condicionados a las restricciones que aplican sobre cada caso particular, y por tanto, que resultan difíciles de incorporar en un proceso de análisis del conjunto del sector edificación como el aquí abordado, sin llegar a unos resultados excesivamente optimistas. En efecto, restricciones como condicionantes específicos del diseño del edificio, tanto por funcionalidad como por otros criterios arquitectónicos, así como las restricciones que introduce el entorno urbano en el que se va a desarrollar el edificio por lo que respecta a la forma y orientación de las parcelas, llegan a condicionar de forma significativa la forma y orientación que finalmente se proporciona a un edificio⁶²⁴. La propia planificación urbanística ha estado tradicionalmente desligada de las consideraciones energéticas, y las decisiones implementadas en los planes generales de ordenación urbana condicionan en gran medida y durante muchos años aspectos con fuertes implicaciones energéticas, como la forma y orientación de los edificios desarrollados bajo el paraguas de esa planificación, los sombreados estacionales entre edificios⁶²⁵, y el patrón de flujo del aire por el entramado urbano⁶²⁶. El urbanismo bioclimático, mediante la incorporación de estos elementos a la planificación urbana, podría facilitar mucho la transición hacia un contexto de eficiencia en el sector edificación, y en el caso de ampliar su ámbito de actuación para evolucionar hacia un urbanismo sostenible, podría tener importantes impactos beneficiosos sobre otros sectores energéticos de gran peso como el transporte.

En el ámbito de este estudio, no se ha incorporado la optimización de elementos de forma y orientación en el modelo del sector edificación por varios motivos:

- Limitación del alcance del trabajo, que excluía completamente la posibilidad de optimizar

623 Eliminar o reducir sustancialmente consumos "parásitos" como los de *stand-by* o los asociados a condiciones de bajo uso.

624 En este contexto, los criterios energéticos deben interactuar con otros criterios de diseño para influir sobre la forma y orientación que finalmente se adopte, de tal forma que el resultado final refleje, por lo menos, un cierto nivel de compromiso con las prestaciones energéticas. Para que esto sea así, es imprescindible que los mecanismos de incentivación de la eficiencia reaccionen ante elementos de diseño tan importantes como la forma del edificio. Lamentablemente, la calificación energética de edificios terciarios, al emplear una escala de calificación relativa, es totalmente insensible a la forma y orientación del edificio, motivo por el cual no permite que las consideraciones energéticas participen en la determinación final de la forma y orientación del edificio durante la etapa de diseño.

625 Que a su vez condicionan tanto su demanda de refrigeración como la de calefacción (aportes solares pasivos), así como la posibilidad de integración de sistemas solares en la envolvente del edificio.

626 Que a su vez condiciona tanto el potencial de aplicación de estrategias de ventilación natural, de implementación de estrategias de refrigeración pasiva, y las pérdidas convectivas de la envolvente de los edificios al aire.

cada uno de los modelos de edificio al representar a los distintos modos considerados en términos de forma y orientación para cada emplazamiento climático.

- Necesidad de representar con un solo modelo de edificio cada uno de los modos considerados, de tal forma que el resultado pudiera considerarse representativo del conjunto del parque de edificios. Dado que en el pasado el despliegue del urbanismo bioclimático ha sido prácticamente nulo, y puesto que esta planificación urbanística energéticamente insensible condicionará gran parte del parque de edificios existente en el año 2050, parece más correcto representar el conjunto del parque con un modelo en que no se han optimizado los grados de libertad de forma y orientación.
- El resultado al que se llega al no incorporar las consideraciones del urbanismo bioclimático y algunos de los elementos del diseño solar pasivo⁶²⁷ es conservador, dejando un margen de mejora para el diseño de cada edificio particular que permitirá facilitar la transición hacia un contexto E3.0.

Sin embargo, otros elementos pasivos, como son los espesores de aislante, las roturas de puente térmico, la inercia térmica, las ganancias solares para calefacción, las protecciones solares, los techos fríos, la refrigeración por ventilación nocturna, la iluminación natural, etc., sí que se han incorporado en el contexto E3.0, e incluso se han potenciado más allá de su potencial pasivo puro mediante la incorporación de inteligencia.

Por lo que respecta a algunos elementos pasivos tradicionales, como pueden ser los aleros para gestionar estacionalmente el sombreado sobre los acristalamientos del edificio, no aparecen incorporados explícitamente en el

contexto E3.0 por haber sido sustituidos de cara al año 2050 por componentes inteligentes de la envolvente que permiten incrementar el rendimiento con el que se desarrollan las funciones de estos elementos. En efecto, en el diseño de un elemento pasivo como un voladizo, siempre es necesario llegar a un compromiso entre sus efectos positivos (limitación de aportes solares en régimen de refrigeración) y los negativos (reducción de aportes solares pasivos en época de calefacción), de tal forma que como consecuencia de su rigidez en las estaciones intermedias siempre conllevan una cierta penalización, aunque su efecto anual neto, si están bien diseñados, siempre sea positivo (García-Casals X., 2003-1). En el contexto E3.0, la aparición de elementos activos inteligentes⁶²⁸ permiten obtener un beneficio mucho más elevado del aspecto positivo (mayor grado de protección solar) sin tener que incurrir en las penalizaciones asociadas a la rigidez de los elementos tradicionales, por responder de forma dinámica a las necesidades reales⁶²⁹ de cada instante. Sin embargo, esto no quiere, ni mucho menos, decir que los elementos pasivos tradicionales no puedan y deban desempeñar su papel en el proceso de transición hacia el contexto E3.0, e incluso ocupar su nicho en ciertos tipos de edificios de cara al año 2050.

Otro punto que merece ser comentado explícitamente es el tema de las optimizaciones de costes, en relación al equilibrio entre aplicación de medidas de eficiencia y generación de energía. Es decir: hasta qué punto queda justificada la aplicación de medidas de eficiencia y a partir de qué punto resulta más adecuado desplegar una capacidad de generación adicional para cubrir el remanente de la demanda. En este estudio no hemos acometido un análisis detallado de este aspecto, por quedar fuera del alcance del trabajo a desarrollar, aunque sí que proporcionaremos

⁶²⁷ Que por otro lado, tal y como comentábamos anteriormente, son muy dependientes de cada caso particular y por tanto difícilmente generalizables al conjunto del parque de edificios.

⁶²⁸ Como pueden ser los acristalamientos dinámicos que modifican sus características termo-ópticas en respuesta a las necesidades reales de cada instante.

⁶²⁹ Demanda de calefacción o refrigeración, necesidad de incrementar el aislamiento, requerimientos de iluminación natural, etc.

alguna evaluación cuantitativa para contextualizar y justificar las decisiones adoptadas.

A falta de desarrollar el proceso de optimización económica, la aproximación que hemos adoptado para establecer los niveles de eficiencia desplegados se apoya en los siguientes planteamientos:

- Para aquellos elementos sobre los que hemos desarrollado un estudio paramétrico (como los espesores de aislante), hemos adoptado como nivel de eficiencia a desplegar, aquel que corresponde al codo anterior a que se sature su efecto sobre el ahorro de energía, que de forma práctica hemos definido como aquel valor, a partir del cual, la tasa de mejora se reduce por debajo de un valor umbral. La lógica detrás de este planteamiento es considerar que en la región en que una medida de eficiencia es efectiva en la reducción de la demanda, siempre resultará más apropiado desplegar esta medida de eficiencia que incrementar la capacidad de generación para cubrir esa demanda⁶³⁰.
- En el caso de los equipamientos, por lo general, hemos considerado que el despliegue de medidas de eficiencia seguirá una evolución tendencial desde las mejores aplicaciones actualmente disponibles en el mercado, y establecerá un nivel de eficiencia en el año 2050 que, o bien queda dentro de escenarios ya elaborados para la tecnología en cuestión, o bien se queda suficientemente por debajo de los límites de eficiencia teóricos de las soluciones tecnológicas actuales⁶³¹.
- Sobre algunos componentes de algunos modos de edificios no hemos desarrollado estudios paramétricos para su optimización, por limitación del alcance del trabajo aquí

desarrollado, y hemos adoptado directamente la configuración de partida de los modelos BAU⁶³², o los resultados procedentes de la optimización en otro modelo de edificio⁶³³. Este planteamiento también es bastante conservador en el sentido de que existe un potencial de mejora adicional respecto a lo que nosotros reflejamos en los resultados de este trabajo, que se puede desplegar mediante la optimización de las distintas variables que nosotros no hemos optimizado.

Y por lo que respecta al fondo filosófico del balance entre el despliegue de medidas de eficiencia y generación adicional, los puntos fundamentales en los que se apoya nuestro planteamiento son los siguientes:

- La situación a la que nos ha conducido nuestra evolución hasta la actualidad, con muy poco peso de las consideraciones de eficiencia, nos ha dejado como herencia un despliegue de infraestructuras energéticas, tanto para generación⁶³⁴ como para transporte, que en la actualidad ya conllevan unos impactos importantes tanto a nivel económico como ambiental. Con la perspectiva de tener que acomodar hasta el año 2050 un crecimiento significativo de las demandas de servicios y, en aras a acotar el impacto de la infraestructura energética, parece un planteamiento adecuado el intentar mantenernos dentro del margen que nos proporciona el sobredimensionado actual de las infraestructuras energéticas, para acomodar el crecimiento de la demanda de servicios, empleando el despliegue de las medidas de eficiencia para cubrir nuestra demanda de servicios con una infraestructura del orden de la actual. Estas consideraciones adquieren todavía más peso en el contexto E3.0 en el que se plantea una gran electrificación del sistema energético, motivo por el cual al

630 Más adelante volveremos sobre este aspecto.

631 Hay que tener presente, que para el año 2050 pueden haber surgido otras tecnologías distintas a las actuales cuyos límites teóricos de eficiencia sean superiores, por lo que este planteamiento consideramos que es suficientemente conservador.

632 Por ejemplo, en el caso de la distribución de superficies acristaladas.

633 Como es el caso de los espesores de aislamiento para el contexto E3.0.

634 Por lo que respecta a la generación, el planteamiento del contexto E3.0 es sustituir toda la infraestructura fósil o nuclear actual mediante fuentes de energía renovables, con un carácter mucho más distribuido, y una densidad de potencia menor de la propia central de generación (aunque en el caso de la mayoría de las renovables la central de generación incluye también la "minería" del recurso energético). Si bien el recurso renovable del que disponemos en nuestro país nos permite cubrir de cara al año 2050 incluso una demanda BAU, pero el requerimiento de infraestructuras de generación se dispararía.

crecimiento de la demanda de servicios se añadiría este cambio modal, para sobrecargar todavía más los requerimientos de infraestructuras eléctricas. En estas condiciones resulta prioritario el acotar la demanda de sectores como el de la edificación, que evoluciona en el contexto E3.0 hacia una electrificación total con el fin de contener el crecimiento de las infraestructuras eléctricas y su asociado impacto.

- A pesar de que el elevado potencial de recursos renovables con el que contamos (GP, 2050) nos permitiría cubrir de forma “holgada” incluso una demanda BAU para el año 2050, tal y como apuntábamos al principio de este informe esto no nos situaría en una senda de sostenibilidad, pues sería tan solo cuestión de tiempo el que una demanda creciente llegara a agotar los recursos renovables disponibles. En este sentido, el despliegue de la eficiencia para acotar el crecimiento de la demanda es una condición sine qua non para establecerse en una senda de desarrollo sostenible. Y dada la dimensión global que ha adoptado el modelo de crecimiento basado en el galopante incremento del consumo de energía, y el gran riesgo que corremos si las economías emergentes y países menos desarrollados adoptan el mismo patrón de evolución, se impone un planteamiento de contracción y convergencia que proporcionen alternativas de aplicación a nivel global en cortos plazos de tiempo, lo cual requiere un rápido despliegue de la eficiencia energética, que actuando como mecanismo de palanca permita modificar la senda de desarrollo global hacia la sostenibilidad⁶³⁵.

Y dentro del sector edificación, estos planteamientos de apurar el potencial de las medias de eficiencia caen completamente dentro de las iniciativas actuales que tanto en EE. UU.

como en Europa apuntan ya de forma decidida hacia los edificios de consumo neto cero para un plazo tan cercano como 2015-2020.

Pasamos a continuación a proporcionar una breve descripción de los principales elementos de eficiencia considerados en el desarrollo de los modelos de edificios de este estudio.

3.7.6.1 Envoltente edificio

La envoltente del edificio, como tercera piel de las personas que utilizamos el edificio, constituye un elemento de gran importancia sobre las prestaciones energéticas del edificio para cubrir la demanda de servicios de confort, y condiciona en gran medida sus demandas de climatización y de iluminación.

En este punto discutimos brevemente los elementos opacos y traslúcidos de la envoltente del edificio, para dar indicaciones en torno a las hipótesis realizadas sobre las mismas para configurar los contextos BAU y E3.0.

3.7.6.1.1 Cerramientos opacos

Los cerramientos opacos del edificio condicionan fuertemente la demanda de calefacción⁶³⁶ del edificio, y pueden afectar también de forma relevante a su demanda de refrigeración⁶³⁷. El nivel de aislamiento de estos componentes constituye uno de los elementos principales de la limitación de la demanda energética del edificio de forma pasiva. En el contexto E3.0, el requerimiento de minimizar en origen la demanda de energía del sector edificación para no sobrecargar los requerimientos de capacidad de generación y transporte de energía eléctrica, debido a la integración y electrificación del sistema energético, conduce a la exigencia de

⁶³⁵ Y al igual que con el despliegue de la generación renovable, la responsabilidad del despliegue de la eficiencia energética recae sobre los países que a base de ineficiencia y elevado consumo de recursos fósiles se han situado en una situación ventajosa respecto al resto del planeta.

⁶³⁶ Esta demanda está constituida fundamentalmente por las pérdidas de transferencia a través de la envoltente del edificio y por las necesidades de ventilación del espacio interior, aunque en algunos casos hay equipamientos, como los equipos de refrigeración de alimentos, que pueden afectar significativamente a esta demanda.

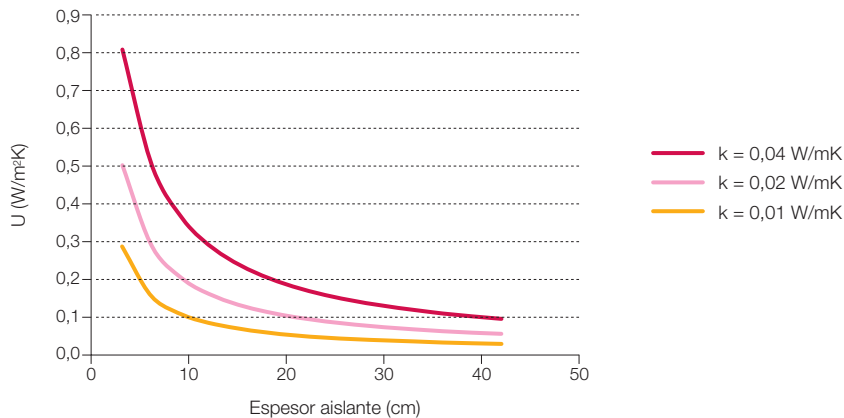
⁶³⁷ Tanto por la restricción a las ganancias por transmisión debidas a diferencias de temperatura con el exterior, como por el impedimento a la disipación de las cargas internas en algunas tipologías de edificios.

apurar al máximo las posibilidades del aislamiento de los cerramientos opacos del edificio. Con este motivo, más adelante hemos procedido a optimizar los espesores de aislante para cada emplazamiento climático, de tal forma que los niveles de aislamiento en el contexto E3.0 difieren significativamente entre unos emplazamientos y otros, lo que conduce a una gran regularización espacial⁶³⁸ de la demanda de energía, para climatizar los edificios dentro de la España peninsular.

El parámetro principal⁶³⁹ que caracteriza el comportamiento térmico de la componente opaca es su coeficiente de transferencia U, cuyo valor viene fuertemente condicionado por la cantidad y características del aislante empleado. Como referencia de los valores del coeficiente U que puede tener sentido implementar, en el estándar Passiv Haus se emplean valores del orden de $U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, que como veremos más adelante tienen sentido en algunos emplazamientos climáticos de la España peninsular, pero resultan excesivos para otros emplazamientos.

Para visualizar los requerimientos asociados a alcanzar estos valores del coeficiente U, en la figura 302 mostramos la dependencia del coeficiente U con el espesor de aislante empleado para la configuración de muros del edificio de referencia empleado para describir la edificación residencial, para distintos valores de la conductividad térmica del aislante empleado. La conductividad $k = 0,04 \text{ W/mK}$ representa un valor muy normal⁶⁴⁰ entre los materiales aislantes empleados en la actualidad, por lo que resulta adecuado para visualizar los requerimientos de aislamiento en relación a los valores actualmente implementados en los edificios. Una conductividad $k = 0,02 \text{ W/mK}$ se encuentra en el límite inferior de las conductividades de aislantes comercialmente disponibles en la actualidad. Con la aplicación de nanotecnología a los materiales de construcción, es posible evolucionar hacia valores todavía inferiores de la conductividad. De cualquier forma, dado que en la resistencia térmica de un aislante intervienen tanto su espesor como la conductividad, es posible alcanzar los niveles deseados de coeficiente U

Figura 302. Relación entre el coeficiente U y el espesor de aislante (para tres valores distintos de la conductividad térmica) en el muro del edificio de referencia de los edificios residenciales distintos a los de bloque de vivienda.



638 Situación muy distinta a la que impulsa la regulación energética actual (CTE).
639 Hay otros parámetros relevantes, como su reflectancia solar y la cantidad y distribución de inercia para la gestión local de la demanda energética.
640 Más bien tirando a elevado.

incrementando los espesores de aislante según sea necesario para el valor de la conductividad del aislante elegido⁶⁴¹. Como nos muestra esta figura, para alcanzar los niveles de aislamiento del estándar Passiv Haus con un material aislante de $k = 0,04 \text{ W/mK}$ es preciso emplear espesores de aislante del orden de 35 cm, mientras que este espesor se reduce al orden de 20 cm al usar un material con $k = 0,02 \text{ W/mK}$ y a 10 cm al emplear un material con $k = 0,01 \text{ W/mK}$, estando este último valor ya muy cercano a los espesores actualmente implementados.

3.7.6.1.2 Acristalamientos

Las superficies acristaladas constituyen un componente muy importante de los edificios. Además de permitir la comunicación visual entre el interior y el exterior del edificio, tienen repercusiones muy importantes desde el punto de vista energético:

- Constituyen el método más sencillo y de menor coste para aprovechamiento de la iluminación natural⁶⁴².
- Por ellos se realizan los aportes solares pasivos directos, con efectos beneficiosos para cubrir la demanda de calefacción y negativos de cara a la demanda de refrigeración.
- Condicionan las características de transferencia con el en torno al modificar el coeficiente de transferencia de la envolvente⁶⁴³.

La superficie acristalada de un edificio debe buscar un equilibrio entre los anteriores factores, lo cual conduce a requerimientos contradictorios⁶⁴⁴ que hasta la fecha no han podido ser resueltos por la propia superficie acristalada, requiriendo la participación de otros elementos de la envolvente⁶⁴⁵ que en la medida

de lo posible cubran estas funciones. Esta imposibilidad actual de los acristalamientos para cubrir simultáneamente todos sus requerimientos conduce a la situación de que para cada tipología de edificio exista un valor óptimo de la superficie acristalada en el cual se obtiene el mejor balance entre beneficios e inconvenientes de este elemento. En la arquitectura moderna encontramos, sobre todo en el sector terciario, múltiples ejemplos de edificios en los que se supera ampliamente este valor óptimo, donde se requiere a posteriori el despliegue de elementos de protección solar adicionales y repercuten significativamente en el consumo energético del edificio.

Desde el inicio del uso de las superficies acristaladas en los edificios hasta la fecha se ha avanzado muchísimo en la tecnología, y existen en la actualidad una gran cantidad de productos optimizados cada uno de ellos con una finalidad distinta⁶⁴⁶. Los dos parámetros principales⁶⁴⁷ que distinguen a un acristalamiento desde el punto de vista térmico son su coeficiente de transferencia (U)⁶⁴⁸, y su coeficiente de ganancia solar ($SHGC$)⁶⁴⁹, y ambos han experimentado y seguirán haciéndolo una gran mejora. Como ejemplo, en la figura 303 recogemos las proyecciones del US DOE para la evolución en los próximos años del coeficiente de transferencia de las ventanas⁶⁵⁰.

La mayor limitación actual de la tecnología de acristalamientos es precisamente la ausencia de inteligencia, lo cual les confiere la rigidez de verse atados a unos valores fijos de los coeficientes U y $SHGC$. Y este es precisamente el camino por el que cabe esperar que evolucionen más las superficies acristaladas desde su situación actual⁶⁵¹. Ya existen en el mercado ventanas termocrómicas⁶⁵² y electrocrómicas⁶⁵³ con capacidad de modificar dinámicamente alguna de sus propiedades en función de una señal exterior (irradiación solar)

641 Si bien es cierto que para un valor dado del coeficiente U deseado, el uso de aislantes de conductividad elevada exige espesores de aislante que pueden resultar problemáticos desde el punto de vista de la ejecución constructiva, también es cierto que puede haber motivos para emplear un aislante que no tenga el valor más bajo posible de la conductividad térmica, como pueden ser la biocompatibilidad del material, su potencial de calentamiento global (GWP), o incluso su capacidad de actuar como sumidero de CO_2 al reducir la tasa efectiva de retorno del carbono de la biomasa a la atmósfera.

642 Para zonas interiores del edificio sin posibilidad de disponer de ventanas o lucernarios exteriores, sigue habiendo opciones tecnológicas (tubos de luz, fibra óptica) para transportar la iluminación natural al interior, pero siempre con una menor relación eficacia/coste.

643 Habitualmente los acristalamientos tienen un coeficiente de transferencia más elevado que el asociado a la parte opaca de la envolvente.

644 Permitir el aporte solar en temporada de calefacción y evitarlo en temporadas de refrigeración.

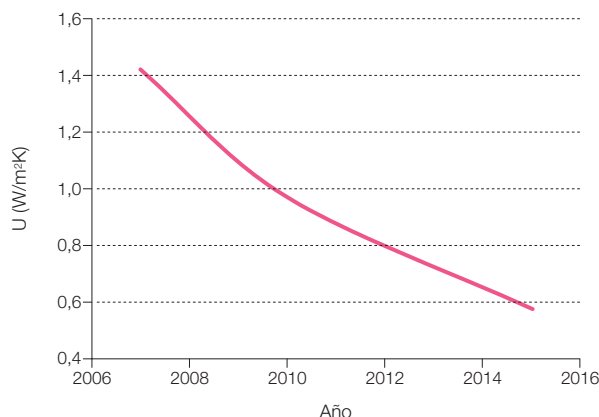
645 Este es el caso de las protecciones solares pasivas, que como tales también deben buscar un compromiso entre sus efectos positivos y los negativos (la reducción de aporte solar en temporada de calefacción).

646 Así, se dispone de ventanas aislantes configuradas con diversas capas de acristalamientos con recubrimientos de baja emisividad, y gases de baja conductividad en las cámaras interiores, así como de ventanas con recubrimientos de protección para evitar la entrada de la fracción no visible de la radiación solar (limitando así los aportes térmicos en temporada de refrigeración).

647 Un tercer parámetro de relevancia es la transmisividad luminosa del acristalamiento, que condiciona su capacidad de contribuir a la iluminación natural de los espacios.

648 En general podemos hablar de tres coeficientes U en una ventana: el del vidrio no perturbado por efectos de borde (centro del vidrio), el del marco, y el del conjunto del hueco, que además de ponderar los valores de vidrio y marco incorpora los efectos de borde (o puentes térmicos) asociados al encuentro entre

Figura 303. Proyección del DOE para el coeficiente de transferencia térmica de las ventanas, en el marco del programa Net-zero energy commercial building initiative⁶⁵⁴.



o del sistema de control del edificio, y su participación a mayor escala en el mercado no se encuentra tan alejada⁶⁵⁵. Este comportamiento dinámico debe extenderse también a la capacidad aislante del acristalamiento, para evitar la penalización que este elemento de la envolvente introduce actualmente sobre el desempeño energético del edificio en esas condiciones, en las que no realiza aportaciones positivas⁶⁵⁶ y por el contrario penaliza debido a su mayor coeficiente de pérdidas.

De cara al contexto E3.0, debido a la necesidad de su implementación en programas de simulación del edificio, hemos optado por configurar el acristalamiento de acuerdo con las capas actualmente disponibles de forma comercial⁶⁵⁷, aunque sin lugar a dudas para el año 2050 existirán nuevas capas con capacidad de obtener unas prestaciones globales de acristalamiento significativamente mejores a las que nosotros vamos a usar y con mayor simplicidad constructiva. El objetivo en el contexto E3.0, en el cual contamos con un despliegue de inteligencia que proporciona un control dinámico de las características del acristala-

miento, es obtener valores lo más bajos posibles del coeficiente U con los valores más elevados posibles del SHGC⁶⁵⁸.

La figura 304 recoge la composición por capas, y las prestaciones del acristalamiento implementado en el contexto E3.0. Como podemos ver, se trata de un acristalamiento triple con un valor de $U_v = 0,595 \text{ W/m}^2\text{K}$ del orden de magnitud del previsto para el conjunto del hueco por el programa Net-Zero Energy Commercial Building Initiative (Iniciativa de edificios comerciales con un consumo de energía cero neto) del DOE para el año 2015, y con un SHGC = 0,49 peor del SHGC = 0,53 que pronostica este programa de desarrollo de cara al año 2015. En estas condiciones, el valor del coeficiente U del conjunto del hueco⁶⁵⁹ en el contexto E3.0 se sitúa en $U = 0,82 \text{ W/m}^2\text{K}$, que resulta superior al valor de $U = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ que usa ya en la actualidad el estándar Passiv Haus. Por estos motivos podemos afirmar que el acristalamiento considerado para el contexto E3.0 representa una aproximación muy conservadora del potencial que podríamos esperar para el año 2050 en este componente.

vidrio y marco. Mientras no indiquemos lo contrario, el valor del U que mostraremos es el del conjunto del hueco.

- 649** SHGC: Solar heat gain coefficient. También denominado coeficiente "g".
- 650** Los valores representados en esta figura recogen la mejor tecnología disponible. A modo de referencia, en la actualidad, y a pesar de la dispersión entre distintos productos, el orden de magnitud de los coeficientes U para acristalamientos típicos disponibles en el mercado (sin ser la mejor tecnología disponible) son de $U_v = 5,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ para un acristalamiento sencillo, $U_v = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$ para un acristalamiento doble, y $U_v = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ para un acristalamiento doble con recubrimiento bajo emisivo.
- 651** Como comentábamos más arriba, elementos pasivos tradicionales como los voladizos u otras protecciones solares pueden desempeñar también parte de estas funciones de complemento para modificar estacionalmente los coeficientes efectivos del hueco, pero por lo general conllevan un compromiso entre sus efectos positivos y efectos negativos colaterales. Sin embargo, estos elementos pasivos tradicionales deben jugar un papel importante en el proceso de transición hacia el contexto E3.0.
- 652** Los cristales termocrómicos modifican su SHGC en función de la radiación solar que incide sobre ellas.
- 653** Los cristales electrocrómicos modifican sus características (fundamentalmente su SHGC) en función de una señal eléctrica.
- 654** El objetivo de este programa es alcanzar edificios comerciales cero neto viables económicamente para el año 2025 (ZEB), y residenciales en 2020 (ZEH). La definición que emplean de edificios de consumo cero neto es la de edificios que generan tanta energía como consumen, combinando medidas eficiencia con capacidad generación local de acuerdo con tecnologías renovables.
- 655** En el programa Net-Zero Energy Commercial Building Initiative del US DOE anteriormente comentado, cuentan con que para el año 2015 el control dinámico de las ventanas ya permitirá variar la transmitancia luminosa entre el 65% y el 2% y el SHGC entre 0,53 y 0,09.
- 656** Por ejemplo cuando no hay sol para realizar aportes pasivos a la cobertura de la demanda de calefacción o a los requerimientos de iluminación.

Figura 304. Capas y características del acristalamiento empleado para el contexto E3.0⁶⁶⁰.

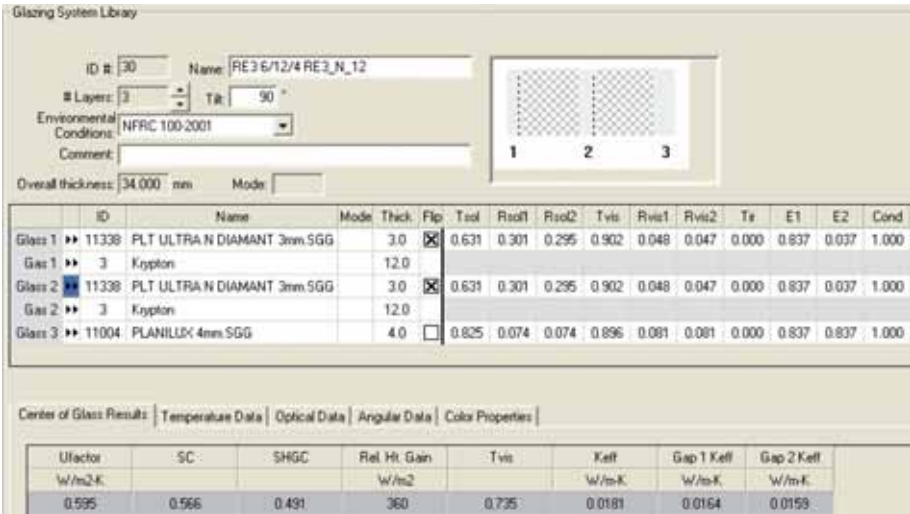
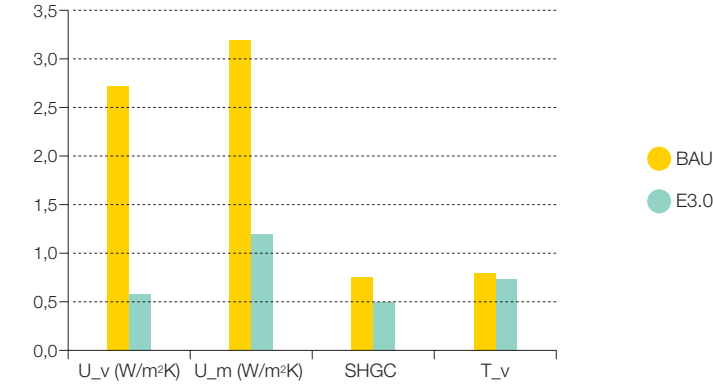


Figura 305. Comparativa entre las características de los elementos del hueco en los contextos BAU y E3.0 (U_v = coeficiente U del vidrio; U_m = coeficiente U del marco; T_v = transmisividad de la radiación visible).



Adicionalmente al acristalamiento, los huecos del edificio cuentan con un marco para integrar ese acristalamiento, y a menudo con una serie de puentes térmicos asociados a la inserción del hueco en el resto de la envolvente y a la unión marco-vidrio. También para el caso del marco

hemos introducido una mejora de cara al contexto E3.0. En la figura 305 presentamos una comparación de las principales características del hueco en el contexto E3.0 y lo que podría ser una tecnología representativa del contexto BAU⁶⁶¹ para el conjunto del parque de edificios.

657 Lo cual constituye un enfoque conservador, pues conduce a unas prestaciones del acristalamiento peores a las que cabría esperar con el tendencial de desarrollo de esta tecnología. En parte compensamos esto considerando un acristalamiento triple, pero como veremos, a pesar de ellos las prestaciones resultantes del acristalamiento son peores de las que se proyectan ya de cara al año 2015.

658 En efecto, al disponer de elementos dinámicos con capacidad de proporcionar protección solar en los momentos en que sea necesario, el estado no perturbado del acristalamiento debe tener elevados valores del SHGC para maximizar su capacidad de aporte solar para cubrir la demanda de calefacción y no perjudicar su transmisividad luminosa para contribuir a la iluminación natural.

659 Ponderación de los valores de vidrio y marco e incluyendo los puentes térmicos de unión vidrio-marco y pared-marco.

660 Generado con el programa WINDOW del LBNL.

661 Realmente, para la mayoría de los modelos de edificios empleados, el BAU es ligeramente distinto a este acristalamiento y marco que presentamos aquí (viene definidos por std 90.1-2004). Pero básicamente lo que define la tecnología del hueco en el caso BAU es un acristalamiento doble con aire en la cámara interior, y un marco metálico con rotura de puente térmico.

Por último, la característica diferencial del contexto E3.0 frente al contexto BAU es el dotar de inteligencia a los huecos del edificio, con capacidad de alterar sus coeficientes U y SHGC de forma dinámica según las necesidades de climatización de los espacios interiores del edificio.

3.7.6.2 Iluminación

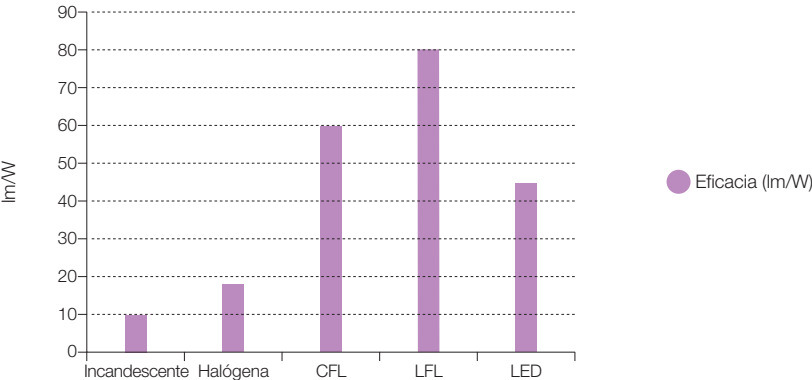
La iluminación de los espacios interiores de los edificios constituye un elemento importante de la demanda de energía de este sector, que actualmente incluso puede dominar la estructura de la demanda energética del edificio en situaciones donde se requieran elevadas iluminancias de los espacios durante periodos de tiempo muy prolongados.

A lo largo del tiempo hemos visto evolucionar de forma significativa la eficacia de las tecnologías empleadas para cubrir la demanda de iluminación⁶⁶², pero también hemos visto

crecer la demanda de iluminación. Afortunadamente todavía disponemos de un importante margen de mejora de las eficacias luminosas de las lámparas y de los rendimientos de las luminarias empleadas, a lo que se debe unir la introducción de la iluminación natural⁶⁶³ y de los elementos de inteligencia⁶⁶⁴ para reducir de forma muy importante el consumo de energía asociado a la iluminación.

Las eficacias luminosas de las lámparas que actualmente encontramos en el mercado son todavía bastante bajas respecto al potencial tecnológico. En la figura 306 recopilamos valores medios de las eficacias luminosas de un muestreo realizado en enero de 2010. En ella podemos observar cómo los tubos fluorescentes proporcionan actualmente los mejores niveles de eficacia⁶⁶⁵, mientras que las lámparas LED⁶⁶⁶, se encuentran significativamente por debajo. Sin embargo, ya existen algunos productos de tecnología LED en el mercado que alcanzan niveles de eficacia comparables a los de los tubos fluorescentes, y su potencial

Figura 306. Valores medios de la eficacias luminosas de lámparas comercialmente disponibles en un muestreo del mercado realizado el 1/2010. (CFL: lámpara fluorescente compacta; LFL: lámpara fluorescente lineal; LED: diodo emisor de luz).



⁶⁶² Por ejemplo, en EE. UU., antes de la crisis energética del 1974, era habitual diseñar los edificios de oficinas con potencias de iluminación superior a 50 W/m², mientras que actualmente un buen diseño puede estar por debajo de los 10 W/m².

⁶⁶³ Tanto desde las ventanas y lucernarios, como mediante los tubos de luz y la fibra óptica que permiten llevar la iluminación natural hasta espacios interiores de los edificios.

⁶⁶⁴ Entre los que se encuentra la diferenciación espacial y ajuste de las iluminancias según requerimientos reales e instantáneos de la demanda de iluminación.

⁶⁶⁵ Pudiendo llegar a superar los 110 lm/W en los productos más eficientes.

⁶⁶⁶ De las que a menudo no se proporciona información de eficacia luminica.

tecnológico de mejora en los próximos años puede llevar a alcanzar eficacias del orden de los 230 lm/W.

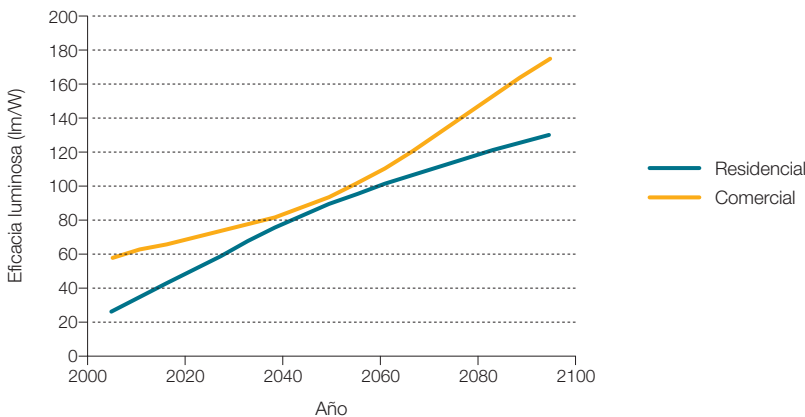
En (F. Rong, L. Clarke, S. Smith, 2007) encontramos un escenario de evolución de las eficacias luminosas del mix de tecnologías de iluminación empleado en edificios residenciales y comerciales. La figura 307 recoge este escenario. Si bien, como puede observarse, la mejora respecto a la situación actual es muy importante, pero la tendencia de mejora es prácticamente monótona⁶⁶⁷ a lo largo de todo este siglo, e indica la ausencia de mecanismos de aceleración de la introducción de medidas de eficiencia, por lo que este escenario parece poco compatible con la urgencia de intentar estabilizar el sistema climático, y la necesidad de acotar la demanda energética global. De hecho, resulta indicativo que en estos escenarios para el año 2100 se sigue suponiendo una cierta participación de las lámparas incandescentes en el mix de lámparas implementadas en ese año.

De hecho, las proyecciones del DOE⁶⁶⁸ para la evolución de la tecnología LED en los próximos años conducen a la disponibilidad de niveles muy superiores de eficacia luminosa en plazos mucho más cortos de tiempo, tal y como muestra la figura 308, con un límite de prestaciones de la tecnología LED de 230 lm/W que según esta referencia se podría alcanzar para el año 2018.

De hecho, en la literatura asociada al programa ZEB de edificios comerciales que impulsa el DOE manejan valores de eficacia luminosa del orden de 200 lm/W para el año 2025 (B. Griffith, P. Torcellini, N. Long, D. Crawley, J. Ryan, 2006).

Las implicaciones energéticas de acelerar el despliegue de las medidas de eficiencia para la iluminación de los espacios interiores de los edificios resultan evidentes en el contexto de la tendencia creciente de la demanda de servicios de iluminación con el PIB. En la figura 309 reproducimos esta tendencia según ([R]E, 2008) para el caso de los

Figura 307. Evolución de la eficacia luminosa promedio del mix de tecnologías empleado para edificios residenciales y comerciales según (F. Rong, L. Clarke, S. Smith, 2007).



⁶⁶⁷ Incluso con mejores tasas de mejora hacia el final del periodo considerado en el caso de los edificios comerciales.

⁶⁶⁸ DOE: Departamento de Energía de Estados Unidos. Proyecciones del: NGLIA LED Technical Committee and the Department of Energy, Fall 2007.

edificios residenciales. En la figura 310 mostramos el impacto energético⁶⁶⁹ asociado a cubrir esta demanda de iluminación a medida que se van introduciendo distintas medidas de eficiencia.

La figura 311 agrupa la información de distintas referencias relativa a la disponibilidad comercial de tecnología eficiente de iluminación, mostrando la evolución que cabe esperar de la eficacia luminosa de las lámparas

Figura 308. Escenario de evolución de la eficacia luminosa de las lámparas LED según el DOE.

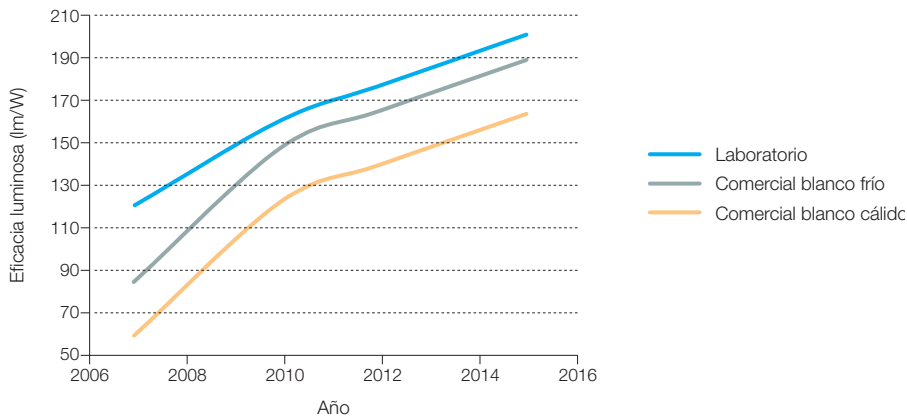
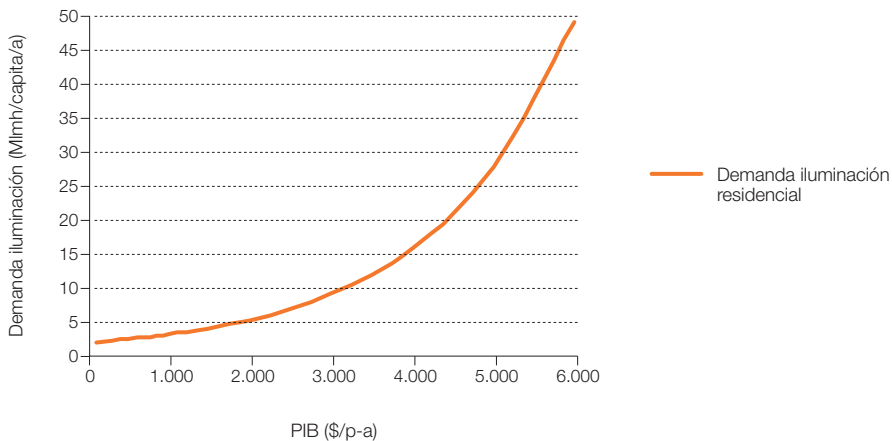


Figura 309. Tendencia del incremento de la demanda de servicios de iluminación con el PIB ([R]E, 2008).



⁶⁶⁹ Adicionalmente al consumo directo para las lámparas, las medidas de eficiencia introducidas en la iluminación de los edificios conducen a una reducción de la demanda de aire acondicionado en los edificios, que especialmente para el sector no residencial puede suponer una importante componente de la demanda, al mismo tiempo que puede incrementar la demanda de calefacción. Estos efectos de interacción entre medidas de eficiencia quedarán recogidos al elaborar los escenarios de demanda energética de los edificios mediante simulación dinámica.

Figura 310. Impacto sobre el consumo de energía asociado a satisfacer la demanda de servicios de iluminación al introducir distintas medidas de eficiencia ([R]E, 2008).

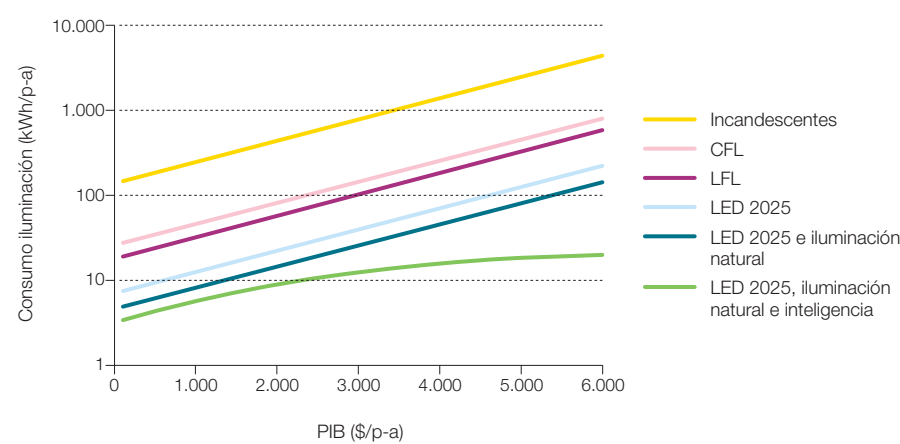
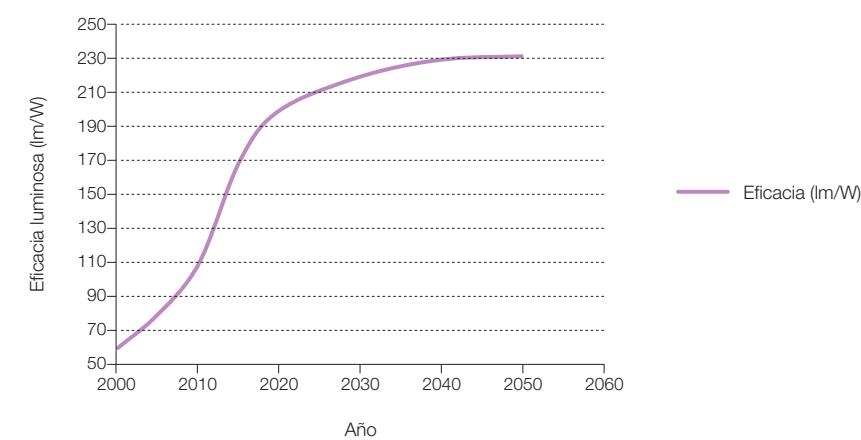


Figura 311. Disponibilidad comercial de tecnologías eficientes de iluminación.



si se incentiva la penetración en el mercado de las mejores tecnologías disponibles.

luminosas a valores máximos del orden de 110 lm/W.

Según estos resultados, para el escenario E3.0 consideraremos eficacias luminosas que irán de 180 lm/W hasta 220 lm/W según el tipo de espacios considerados, mientras que en el contexto BAU limitaremos las eficacias

En el contexto E3.0 se realizará un extensivo uso de la iluminación natural, tanto en zonas perimetrales con los elementos de acristalamiento del edificio, como en los espacios interiores mediante los tubos de luz

y la tecnología de fibra óptica. Adicionalmente, en el contexto E3.0 se incorporarán elementos de inteligencia en los sistemas de iluminación para ajustar el consumo de energía a la cobertura de la demanda real de servicios lumínicos (controles ocupación, adaptación espacio-temporal de la iluminación a las necesidades reales, etc.).

3.7.6.3 Equipamientos

Por equipamientos nos referimos a los consumos de proceso asociados a la operación de los edificios, que incorporan, por lo general, todos los electrodomésticos, ordenadores y otras cargas eléctricas, así como los equipamientos que consumen combustibles (como las cocinas), y otros equipos consumidores de energía asociados al desarrollo de la actividad del edificio considerado.

Los equipamientos de los edificios ya constituyen hoy en día un componente importante del consumo, que incluso llega a ser la dominante en algunas tipologías de edificios. Pero de cara al futuro, a medida que se vayan incorporando medidas de eficiencia en aquellos componentes de consumo del edificio sobre los que regulamos límites máximos de consumo, y a medida que vaya creciendo el requerimiento de incorporar equipamientos diversos en ciertas tipologías de edificios como los residenciales, los equipamientos irán ganando peso relativo en la estructura de consumo energético de los edificios, hasta llegar a convertirse en componentes dominantes en contextos eficientes como el E3.0 en muchas tipologías de edificios.

A pesar de esta importancia actual y con tendencia creciente de los equipamientos, en la mayoría de las ocasiones su consumo energético no se recoge dentro de la regulación

energética de los edificios ni de los indicadores empleados para describir las prestaciones energéticas del edificio. De hecho, llegamos a diferenciar entre consumo regulado y no regulado. El consumo regulado por lo general comprende el consumo de climatización y de producción de ACS, y en algunos casos⁶⁷⁰ el consumo asociado a la iluminación. Puesto que el consumo regulado está sometido a restricciones más o menos directas por parte de la regulación correspondiente, la tendencia es a que vaya reduciéndose con el tiempo. Por el contrario, la componente no regulada tendrá una tendencia a evolucionar más lentamente hacia la eficiencia, a lo cual debe añadirse la tendencia a incorporar más equipamientos en los edificios.

Incluso el estándar Passiv Haus, que sí que impone un límite al consumo de energía total del edificio, es mucho más generoso en ese límite (120 kWh/m²-a en términos de energía primaria) que en el límite que imponen sobre la demanda de calefacción (15 kWh/m²-a) que constituye la principal componente regulada en los países⁶⁷¹ donde se originó este estándar.

Pero al evolucionar hacia edificios de bajo consumo (VLEB) o incluso consumo nulo (ZEB), la importancia de las componentes no reguladas se hace patente, de tal forma que es de esperar que se vaya imponiendo poco a poco el consumo de energía total del edificio como indicador de su desempeño energético.

Hasta hace relativamente poco, las consideraciones de eficiencia no figuraban entre los principales criterios de diseño de la mayoría de equipamientos, y en la actualidad sigue siendo así para algunos equipamientos, mientras que en otros estamos asistiendo a una rápida evolución de sus niveles de eficiencia. Por tanto, en conjunto

⁶⁷⁰ A menudo, el consumo de iluminación se deja fuera de la componente regulada en los edificios residenciales.

⁶⁷¹ Alemania y Suecia.

podemos decir que existe un importante potencial de mejora en el consumo energético de los equipamientos, que se materializará tanto por una reducción de las potencias nominales para desarrollar una cierta función, como por la aplicación de controles inteligentes que permitan que el consumo del equipamiento se ajuste a las necesidades reales en cada momento, eliminando los consumos de *stand-by* y otras componentes parásitas. En la web del etiquetado Energy Star⁶⁷² del DOE de los EE. UU. aparecen referenciados los requerimientos de eficiencia por encima del estándar federal, o de los equipos disponibles en el mercado que no cualifican para el etiquetado Energy Star, de distintos tipos de equipamientos, mostrando niveles de ahorro que van desde un 20% a un 90% según al equipo de referencia que sustituyan.

De cara al contexto E3.0 hemos incorporado unos niveles de ahorro potencial en los equipamientos eléctricos más comunes, que en términos de la potencia instalada representan reducciones del 50% al 75% según el tipo de edificio y de uso considerado⁶⁷³.

Por lo que respecta a los equipamientos de cocina, que en el BAU operan de acuerdo con el consumo de gas natural, para el contexto E3.0 hemos considerado su electrificación, lo que permite alcanzar niveles de reducción de potencia instalada en el aparato del orden del 50%⁶⁷⁴, a lo que se añade la aplicación de controles inteligentes.

Por lo que se refiere a los equipamientos más específicos de proceso, y en particular para aquellos con condiciones críticas de uso, como es el caso de los hospitales, los niveles de ahorro considerados han sido más conservadores, y se sitúan en torno a un 30%-40% según el tipo de equipamiento⁶⁷⁵.

Estas estimaciones de potencial de ahorro de los equipamientos introducidas en este estudio hay que considerarlas como una primera aproximación dentro del alcance de este estudio, pero quedan lejos de una cuantificación más precisa del potencial de ahorro que existe en esta componente de consumo energético de los edificios. Dado el dominio que adquiere esta componente en la estructura de consumo en el contexto E3.0 para muchas tipologías de edificios, consideramos que sería muy interesante profundizar en los potenciales técnicos de incremento de eficiencia de las distintas tipologías de equipamientos, así como incorporar esta componente de consumo dentro de la cesta de los consumos regulados para añadir un mayor incentivo de mercado a la progresión de los niveles de eficiencia en estos elementos.

3.7.6.4 Generación de calor y frío: Bombas de calor

3.7.6.4.1 Generalidades

Uno de los elementos tecnológicos que caracteriza el sector edificación en el contexto E3.0 es la completa electrificación de la cobertura de la demanda térmica (calor, frío y ACS⁶⁷⁶). La producción de frío para climatización, tanto en la actualidad como en el contexto BAU, también se realiza con electricidad mediante el empleo de bombas de calor, al igual que la refrigeración para conservación de alimentos. Pero la producción de calor, para calefactar los edificios y para producir ACS, se encuentra dominada tanto en la actualidad como en el contexto BAU por procesos de combustión. En efecto, las calderas, mayoritariamente de combustibles fósiles, constituyen la tecnología dominante para generar calor en el sector edificación.

⁶⁷² <http://www.energystar.gov>.

⁶⁷³ Debemos resaltar que estas mejoras de eficiencia, aun quedando bien por dentro del margen de mejora disponible, son ya bastante importantes, y para su despliegue se requerirá prestar una mayor atención regulatoria a la introducción de eficiencia en estos equipos.

⁶⁷⁴ En términos de reducción del consumo, algunos modelos de cocinas de inducción actuales ya proporcionan mayores niveles de ahorro respecto a las cocinas de gas.

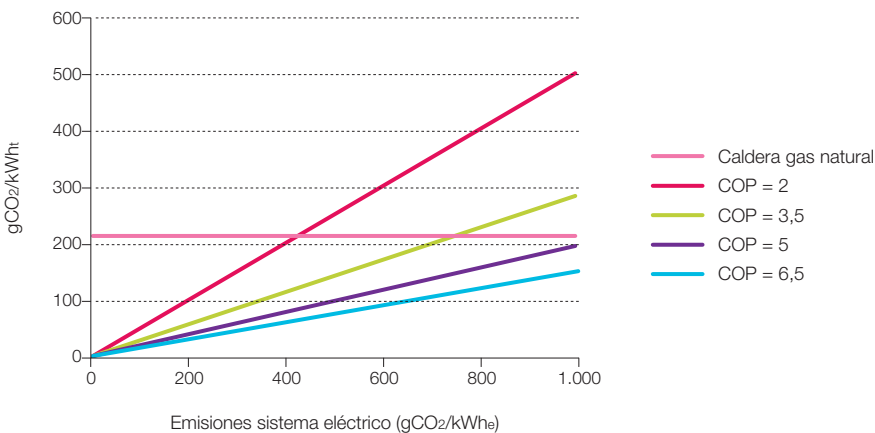
⁶⁷⁵ Dada la limitada accesibilidad a la información técnica de estos equipos, hemos optado por asumir una mejora más conservadora. Sería necesario desarrollar un estudio más específico que escape al alcance de este proyecto para cuantificar con más precisión el potencial de ahorro de estos equipamientos.

⁶⁷⁶ ACS: Agua caliente sanitaria.

La electrificación de la demanda térmica de los edificios, en el contexto E3.0, viene, por un lado, asociada al proceso de integración del sistema energético y al potencial de emplear energía eléctrica residual, procedente de la regulación de un sistema de generación eléctrica basado en las energías renovables, así como por un planteamiento de optimización de las infraestructuras de distribución energética, una vez que la demanda de climatización deja de ser la componente dominante en la estructura energética de los edificios, mientras que las componentes dominantes operan basándose en la electricidad. Pero por otro lado, la evolución de la tecnología de bombas de calor también proporciona una mayor eficiencia a la solución eléctrica que a la de combustión, lo que permite reducir la cantidad de recursos energéticos requeridos para cubrir estas demandas y las emisiones de CO₂ asociadas. En efecto, la figura 312 nos muestra las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de energía térmica, tanto para el caso de emplear una

caldera de gas natural de elevado rendimiento⁶⁷⁷, como para el caso de emplear bombas de calor con distintos COP⁶⁷⁸, como función del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico. Como podemos observar, a medida que se reduce el coeficiente de emisiones de CO₂ del sistema eléctrico, las bombas de calor van mejorando sus prestaciones en términos de CO₂, de tal forma que a partir de un cierto valor del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, tanto más elevado cuanto mayor sea el COP de la bomba de calor, la bomba de calor pasa tener unas prestaciones ambientales superiores a las de la caldera de gas natural. En el año 2008 el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico español era de 390 g CO₂/kWh_e (CNE), y en el año 2009 ya se situó en 270 g CO₂/kWh_e (CNE), por lo que incluso una bomba de calor relativamente ineficiente⁶⁷⁹ con un COP = 2, ya desde el año 2008 resultaba más ventajosa que una caldera de gas natural. Como veremos a lo largo de este punto, el potencial de mejora de la eficiencia de las bombas

Figura 312. Evolución de las emisiones específicas por unidad de energía térmica útil proporcionada de las calderas de gas natural y de bombas de calor con distinto COP, en función del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico.



677 95% de rendimiento medio estacional.

678 COP (Coefficient Of Performance) es el parámetro empleado para caracterizar la eficiencia de una bomba de calor, y se define como el cociente entre la potencia calorífica útil que proporciona, y la potencia eléctrica que consume.

679 Un COP = 2, si fuera en condiciones nominales de diseño, correspondería a una calificación energética clase-G (la peor de toda la escala) según el RD 142/2003 que regula la calificación energética de estos equipamientos. La clase-A se alcanza con COP > 3,6. De cara a los valores presentados en esta figura, el COP es el valor estacional medio, pero ya hay equipos de bomba de calor disponibles en el mercado, que mediante el empleo de las tecnologías de flujo de refrigerante variable y de la recuperación interzonal, permiten incrementar significativamente el COP en condiciones de carga parcial respecto al COP de diseño.

de calor es muy elevado, de tal forma que en un contexto E3.0 podríamos alcanzar valores superiores a COP = 6,5, lo que conduciría a una gran reducción de las emisiones asociadas a la generación de energía térmica incluso con un sistema eléctrico como el actual.

En un contexto E3.0, el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico es cero⁶⁸⁰ (generación basándose en energías renovables), por lo que la bomba de calor alcanza su máxima ventaja respecto a las tecnologías de combustión para la generación de energía térmica⁶⁸¹.

La mayoría de la energía térmica útil proporcionada por una bomba de calor procede de la energía térmica contenida en el ambiente, que actúa como foco frío o caliente, por lo que la electricidad consumida por la bomba constituye una pequeña fracción⁶⁸² de este aporte térmico. Este es el motivo de que el parámetro de eficacia que se emplea para caracterizar el comportamiento de la bomba de calor (COP) tenga un valor superior al 100%.

Las bombas de calor trasvasan (bombean) calor desde un foco frío a un foco caliente, mediante la modificación del nivel de presión de un fluido de trabajo interno que evoluciona de forma cíclica experimentando distintos procesos termodinámicos⁶⁸³. Según aprovechemos la transferencia de calor en el foco frío o caliente, la bomba de calor funciona proporcionando frío o calor. También es posible operar la bomba de calor en modo recuperativo para proporcionar simultáneamente frío y calor útiles, con lo que su COP se incrementa de forma muy importante. Este modo de trabajo puede emplearse, por ejemplo, para producir ACS simultáneamente a refrigeración, o para cubrir demandas simultáneas de frío y calor en algunas tipologías de edificio, o bien

mediante acumulación térmica cubrir demandas de frío y calor no simultáneas.

Respecto a los fluidos de trabajo empleados por las bombas de calor, en el origen de esta tecnología eran fluidos naturales⁶⁸⁴. Posteriormente⁶⁸⁵, surgieron los CFC, que resultaron fluidos de trabajo muy apropiados para la implementación de los ciclos de trabajo de estos equipos, para permitir la diseminación de sus aplicaciones tecnológicas (especialmente refrigeración y aire acondicionado). Recientemente, los CFC se han eliminado por su impacto en el agujero de la capa de ozono, y fueron sustituidos en primera instancia por los HCFC ahora también en proceso de eliminación, y más recientemente por los HFC, para los que también debería plantearse un proceso de eliminación por su impacto como GEI⁶⁸⁶. Actualmente estamos asistiendo al retorno de los fluidos refrigerantes naturales, como el isobutano para los refrigeradores, y el propio CO₂ para bombas de calor avanzadas⁶⁸⁷. En el contexto E3.0, el despliegue de la tecnología de las bombas de calor lo entendemos apoyado en el uso de estos refrigerantes naturales.

Por lo que respecta a la eficacia de las bombas de calor es preciso tener presente que sus prestaciones se ven fuertemente afectadas por los niveles térmicos de los focos frío y caliente. Esto justifica los distintos valores de COP y los potenciales de mejora que encontramos en distintas aplicaciones (producción de frío, calefacción, refrigeración de alimentos, producción de ACS, etc.). De igual forma, esta característica de las bombas de calor recomienda, en los sistemas de climatización, modificar las tecnologías de distribución de la energía térmica para favorecer las condiciones de trabajo del equipo de generación, y pasar de los emisores convencionales basados en procesos de transferencia

680 Esta afirmación es rotunda en el caso de que la biomasa tenga una pequeña participación en el sistema de generación eléctrica, de tal forma que no se quemé biomasa que podría haberse empleado con otra finalidad, que proporcione una mayor eficacia en la fijación de CO₂ atmosférico (como la elaboración de elementos estructurales para la edificación, muebles, o aislamientos térmicos). En el caso de que la biomasa se empleara de forma más extensa en el sistema de generación eléctrica, para mantener esta neutralidad sería preciso que el recurso de biomasa empleado quedara directamente vinculado a plantaciones adicionales a todos los otros usos de mayor eficacia de fijación de CO₂.

681 En estas condiciones, desde el punto de vista de las emisiones de CO₂ el COP de la bomba de calor es irrelevante, pero no lo es desde el punto de vista de la energía necesaria que condiciona los recursos a emplear para configurar el sistema 100% renovable.

682 De hecho esta fracción es 1/COP.

683 En concreto, los cuatro procesos fundamentales que experimenta el fluido de trabajo de las bombas de calor son los de compresión, condensación, expansión y evaporación.

684 Como el amoníaco.

685 En torno a 1930.

686 GEI: Gases de efecto invernadero.

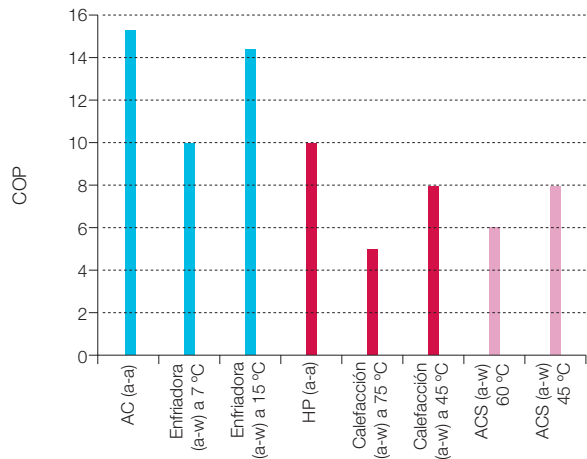
687 Bombas de calor como las de la línea EcoCute que se ha introducido en Japón con COP superiores a los de las otras máquinas del mercado, y con capacidad de trabajar a temperaturas más elevadas con rendimiento aceptable, abriendo las puertas a la tecnología de bombas de calor para las aplicaciones de generación de ACS o de calor industrial.

dominantemente convectivos, que demandan temperaturas bajas para distribución de frío (6-7 °C) y temperaturas elevadas para distribución de calor (75-80 °C), a emisores básicamente radiactivos que puedan trabajar con temperaturas menos extremas (15-18 °C para frío y 35-40 °C para calor), lo cual proporciona otras ventajas desde el punto de visto del confort alcanzable en el interior de los edificios⁶⁸⁸. En otras aplicaciones, como la refrigeración de alimentos, hay menos margen para la modificación de estas temperaturas de trabajo. Por el lado de la disipación de energía en el modo de generación de frío, la implementación de condensadores evaporativos permite reducir la temperatura del foco caliente a costa de consumir

agua. El empleo de una torre de refrigeración, o el uso de una masa de agua o una masa de tierra con condiciones térmicas más favorables⁶⁸⁹ que el aire ambiente, también conducen a una mejora del COP, pero a menudo los consumos parásitos adicionales para explotar esta otra fuente térmica más favorable, no se incluyen en el COP, y conducen a la situación en que no es posible comparar directamente los COP de distintas aplicaciones.

A modo de ejemplo, en la figura 313 recogemos los COP límites que se pueden obtener para distintas aplicaciones de bomba de calor, bajo las condiciones indicadas al pie de la figura⁶⁹⁰. Como podemos observar, eligiendo

Figura 313. Valores límite del COP de bombas de calor en distintas aplicaciones sin procesos recuperativos. AC = acondicionador de aire (bomba de calor trabajando en modo frío); HP = bomba de calor en modo calefacción; a-a = bomba de calor aire-aire (trabaja entre el aire ambiente y el aire dentro del edificio); a-w = bomba de calor aire-agua (trabaja entre el aire ambiente y un circuito de agua para distribución de la energía térmica dentro del edificio); decremento de temperatura del aire de impulsión en modo refrigeración = 10 °C; incremento de temperatura del aire de impulsión en modo calefacción = 15 °C; Temperatura ambiente de condensación en modo frío = 35 °C; Temperatura ambiente en modo calor = 5 °C.



⁶⁸⁸ Como ejemplo, trabajando en modo calor, una bomba de calor aire-agua (es decir, que coge energía térmica del aire ambiente y la transfiere a un circuito de agua a mayor temperatura) puede suministrar agua caliente a 75-80 °C a un circuito de lo que comúnmente se denominan radiadores (pero que realmente son convectores, pues la mayor parte de transferencia térmica al espacio que climatizan se produce por convección al flujo de aire que se origina por la activación térmica que supone la presencia de ese elemento a temperaturas relativamente elevadas), que es el sistema de distribución de calor más común en el parque de edificios residenciales actual. En estas condiciones de trabajo, la bomba de calor debe "bombear" la energía térmica del ambiente a unos 5 °C hasta los 80 °C del circuito de agua de los "radiadores", lo cual implica un salto térmico elevado y conduce a valores relativamente bajos del COP (es decir, el "bombeo" de un "desnivel" térmico tan grande consume mucha electricidad). Pero esa misma bomba de calor también puede usarse para suministrar agua caliente a 35-40 °C a un sistema de distribución del calor por radiación, como los suelos o muros radiantes (que realmente distribuyen la energía por radiación, pues debido a su menor nivel térmico no activan el movimiento del aire en el espacio, por lo que la transferencia convectiva es muy inferior a la radiativa). En estas condiciones, la bomba de calor debe "bombear" la energía térmica del ambiente a unos 5 °C hasta los 40 °C del circuito de distribución radiante, es decir, un "desnivel" térmico muy inferior, lo cual conduce a un COP mucho más elevado y a un consumo de electricidad muy inferior para cubrir esa demanda de calefacción. Los denominados sistemas de hilo radiante, también distribuyen la energía de forma radiante, pero a diferencia de los suelos, muros o incluso techos radiantes con distribución mediante agua no pueden acceder al incremento de eficiencia que proporciona una bomba de calor, pues constituyen un efecto resistivo puro (efecto Joule). Por este motivo los hilos radiantes no los consideramos en el contexto E3.0.

⁶⁸⁹ Como en las aplicaciones geotérmicas.

⁶⁹⁰ Uno de los elementos mediante los que se distinguen las distintas tecnologías de bomba de calor son las condiciones en

los niveles térmicos adecuados para distribuir la energía, el potencial de mejora del COP de las bombas de calor respecto a los valores actualmente disponibles en el mercado europeo, es muy importante⁶⁹¹. Y adicionalmente, las aplicaciones recuperativas mediante el aprovechamiento simultáneo de los flujos de calor en evaporador y condensador, pueden conducir a valores más elevados del COP. También es preciso apuntar que con las tecnologías apropiadas⁶⁹² el comportamiento a carga parcial de las bombas de calor conduce a valores del COP muy superiores a los valores de diseño⁶⁹³.

Una opción para mejorar las prestaciones de las bombas de calor es emplear focos fríos de mayor temperatura en régimen de calefacción, y focos calientes de menor temperatura en régimen de refrigeración. Las bombas de calor geotérmicas buscan este objetivo al sustituir el ambiente exterior por el terreno como foco frío en régimen de calefacción y como foco caliente en régimen de refrigeración, para lo cual requieren la instalación de un intercambiador de calor con el terreno. A pesar del incremento en potencia parásita de bombeo para desarrollar el proceso de intercambio en el intercambiador geotérmico, en condiciones favorables, la mejora de las características térmicas del terreno frente al ambiente exterior proporciona una ventaja significativa de los COP⁶⁹⁴. Sin embargo, para que esta ventaja se mantenga a lo largo del tiempo es preciso que la descarga térmica del terreno en régimen de calefacción sea comparable a su recarga térmica en régimen de refrigeración, lo cual exige que las demandas de calefacción y refrigeración del edificio se encuentren equilibradas, situación que no se da en muchos emplazamientos climáticos de España. En el caso de que no se dé esta condición de equilibrio entre cargas de calefacción y refrigeración, las prestaciones de la bomba de calor se irán degradando a lo largo del tiempo

para el régimen de climatización dominante, y afectarán a la rentabilidad de la inversión en el intercambiador de calor con el terreno (GHTX). Una opción para superar esta limitación en los emplazamientos en los que domine el régimen de calefacción es el plantear un sistema solar térmico con almacenamiento estacional en el terreno que la bomba de calor va a usar como foco frío en temporada de calefacción. Este planteamiento permitiría un mejor aprovechamiento de la capacidad de los sistemas solares térmicos en temporada de verano, pero a no ser que el sistema solar térmico ya fuera contemplado para otra aplicación, incrementa significativamente la inversión en el sistema de climatización. Por otro lado, desde la perspectiva del conjunto del parque de edificios, aquellas aplicaciones en las que resulte viable la instalación de un GHTX resultan relativamente limitadas, lo cual es especialmente cierto en la rehabilitación energética del parque de edificios. Por último, teniendo en cuenta que el objetivo del contexto E3.0 es limitar la demanda de climatización hasta reducirla a valores muy bajos con el fin de no sobrecargar los requerimientos de generación y transporte del sistema eléctrico, la cobertura de esas pequeñas demandas residuales de climatización difícilmente justifica el realizar inversiones muy elevadas. Como consecuencia de estas consideraciones, en este estudio no hemos incorporado explícitamente las bombas de calor geotérmicas en el desarrollo de los escenarios E3.0, lo cual no quita para que esta tecnología pueda jugar su papel tanto en la transición hacia el contexto E3.0 como en el nicho de aplicaciones que puedan quedar asociadas a esta tecnología de cara al año 2050.

3.7.6.4.2 Generación fría

La regulación en Japón de los equipos de aire acondicionado es un ejemplo de cómo se

las que se encuentran los focos frío y caliente entre los que trabajan, pues ellos condiciona fuertemente los niveles térmicos y las características de transferencia desde estos focos al fluido de trabajo de la bomba de calor. En este sentido se habla de sistemas aire-aire (a-a), aire-agua (a-w ; w = water) y agua-agua (w-w), a lo que habría que añadir los sistemas geotérmicos que son tierra-agua (g-w ; g=ground).

691 Los elementos tecnológicos sobre los que es preciso trabajar para acercarse a estos niveles de prestaciones nominales de los equipos de bomba de calor son: dimensionado adecuado de intercambiadores de calor, rendimiento de compresores y ventiladores, recuperación energía expansión, caídas de presión tanto en conductos interiores como en intercambiadores exteriores.

692 Variadores de frecuencia para operación a caudal variable.

693 En efecto, en la actualidad ya hay enfriadoras que a carga parcial alcanzan COP del orden de 20 mientras que en condiciones de diseño tienen COP del orden de seis.

694 A igualdad de tecnologías de bomba de calor.

puede articular un mecanismo de cambio rápido desde la administración. En el año 1999 introdujo las Top Runner Regulations⁶⁹⁵ (bajo el paraguas de la Energy Conservation Law), encaminadas a potenciar la mejora de la eficiencia energética de los electrodomésticos y

vehículos, con el resultado de que en 10 años han conseguido doblar el rendimiento de los acondicionadores de aire domésticos, contando en la actualidad con un mercado formado por equipos mucho más eficientes que los comercializados en Europa o EE. UU.⁶⁹⁶

Figura 314. Evolución del COP de grandes enfriadoras agua-agua (w-w) en EE. UU. y de los pequeños equipos de aire acondicionado (AC) en Japón.

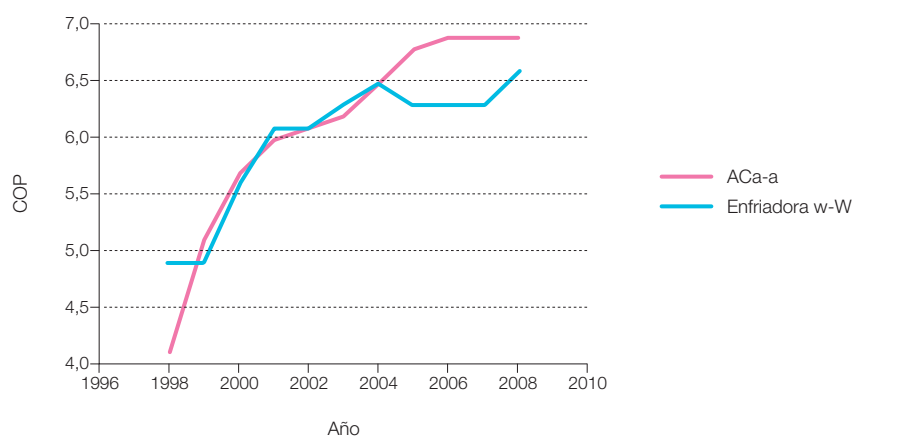
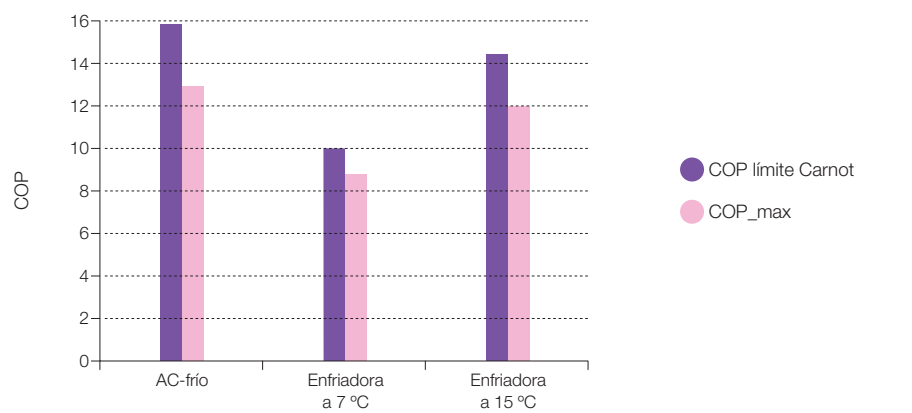


Figura 315. Valores límite termodinámico del COP, y valores máximos a alcanzar del COP considerando los saltos de temperatura requeridos para el intercambio de calor en condensador y evaporador, para distintos equipos de generación de frío. (AC = acondicionador de aire; enfriadora agua-agua).



⁶⁹⁵ Las Top Runner Regulations hacen obligatorio para las empresas que producen o importan los equipamientos por ellas contemplados, que cada año mejoren el rendimiento del mejor producto disponible en el mercado el año anterior.

⁶⁹⁶ Hasta el cuarto informe del IPCC reconoce que los equipos de aire acondicionado en Japón son mucho más eficientes que en Europa y EE. UU. En efecto: mientras los COP en Japón oscilan entre 4,5-6,2, en Europa y EE. UU. se quedan en 2,2-3,8.

En la figura 314 mostramos la evolución del COP de los pequeños acondicionadores de aire en Japón, junto con el de las grandes enfriadoras centrífugas comercializadas en EE. UU. Como puede observarse, a pesar de la gran diferencia de escala y del hecho de que los acondicionadores de aire están refrigerados por aire mientras que las grandes enfriadoras van refrigeradas por agua, el COP de ambos equipos ha seguido una evolución bastante paralela, y ha superado incluso los pequeños acondicionadores a las grandes enfriadoras en los últimos años.

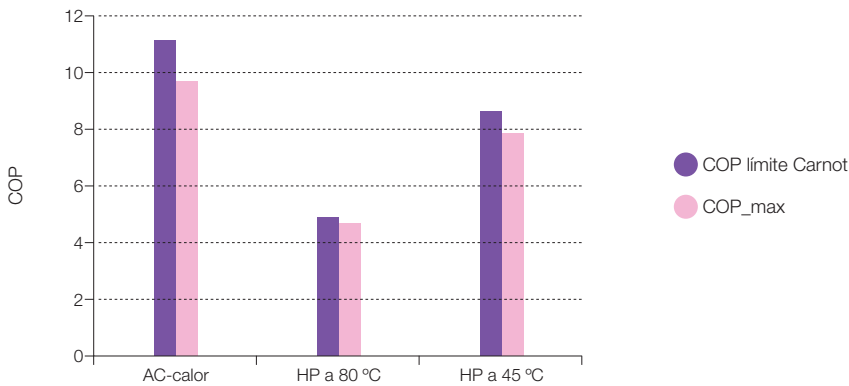
El objetivo de la regulación Japonesa no se para aquí, y en (Cool-Earth Innovative Energy Technology Program, 2008), manifiestan los objetivos⁶⁹⁷ de reducir el precio a la mitad e incrementar el COP al doble (¡COP = 14!). Nosotros hemos sido un poco más conservadores a la hora de asignar los COP del contexto

E3.0. En la figura 315 presentamos los valores límites termodinámicos del COP, así como los valores máximos a alcanzar, considerando unos saltos de temperatura en evaporador y condensador que permitan desarrollarse la transferencia de calor. Para el contexto E3.0 hemos asignado un porcentaje (del orden del 85%) del COP_{max} mostrado en esta figura.

3.7.6.4.3 Generación calor

El uso de las bombas de calor para calefacción es hasta la fecha mucho más limitado que su aplicación para aire acondicionado. Incluso en Japón, donde los equipos de aire acondicionado constituyen una tecnología ampliamente diseminada y con una gran evolución tecnológica respecto al resto del mundo, la aplicación para calefacción de estos equipos se encuentra mucho más limitada.

Figura 316. Valores límite termodinámico del COP y valores máximos a alcanzar del COP considerando los saltos de temperatura requeridos para el intercambio de calor en condensador y evaporador, para distintos equipos de generación de calor según la tecnología de bombas de calor (AC = acondicionador de aire trabajando en modo calor; HP = bomba de calor aire-agua; HP@80 °C = bomba de calor trabajando contra un circuito de distribución de agua a 80 °C; HP@45 °C = bomba de calor trabajando contra un circuito de distribución de agua a 45 °C).



697 Ultra-high efficiency heat pump.

Uno de los motivos para este retraso en la introducción de las bombas de calor aire-aire o aire-agua⁶⁹⁸ para calefacción ha sido la degradación de prestaciones y dificultad de trabajar con rendimientos aceptables con temperaturas exteriores bajas (que son precisamente las que se encuentran en invierno). La formación de hielo en el intercambiador exterior, y los consumos adicionales asociados al proceso de desescarche han contribuido a reducir todavía más el rendimiento de las bombas de calor en condiciones de calefacción⁶⁹⁹.

Sin embargo, en la actualidad esta situación ha cambiado, y ya se encuentran en el mercado bombas de calor con capacidad de trabajar con rendimientos aceptables incluso para temperaturas exteriores muy bajas⁷⁰⁰.

En la figura 316 presentamos los COP límite termodinámico y los COP máximos teniendo en cuenta los gradientes térmicos necesarios para desarrollar los procesos de transferencia en evaporador y condensador para distintas bombas de calor (aire-aire y aire-agua). Como podemos observar en esta figura, en el caso de las máquinas aire-agua la reducción de la temperatura del circuito de agua caliente⁷⁰¹ proporciona un importante margen de mejora. Los valores implementados en el contexto E3.0 han sido un porcentaje (del orden del 85%) de los COP_{max} aquí indicados.

3.7.6.4.4 ACS

En modo de producción de ACS⁷⁰², al igual que en modo de calefacción, el uso de las bombas de calor, hasta la fecha, ha sido mucho más limitado que sus aplicaciones en acondicionamiento de aire. La reducción del rendimiento de la bomba de calor al incrementar la temperatura del foco caliente hasta las condiciones de producción de

ACS habituales (60 °C), y la dificultad de alcanzar estas condiciones de trabajo con los fluidos de trabajo empleados hasta la fecha en las bombas de calor ha limitado mucho sus aplicaciones para generación de ACS.

Sin embargo, desde hace algunos años ya se dispone en el mercado de bombas de calor con capacidad de generar ACS que se apoyan en la capacidad de proporcionar mayores gradientes térmicos a potencia reducida y aprovechan el sobrecalentamiento del gas refrigerante a la salida del compresor. Para el caso de que el modo principal de la bomba de calor sea el de refrigeración, esta producción de ACS constituye un proceso recuperativo del ciclo de trabajo de la bomba de calor, y permite incrementar de forma muy importante el COP con el que trabaja.

Pero sobre todo ha sido a lo largo de los últimos años, con el epicentro de su desarrollo una vez más en Japón, que las bombas de calor para generación de ACS están experimentando un mayor crecimiento, gracias a la introducción del CO₂ como fluido refrigerante para configurar bombas de calor aire-agua capaces de trabajar eficientemente con temperaturas mucho más elevadas en el condensador⁷⁰³. La línea EcoCute de bombas de calor con CO₂ en ciclo supercrítico, se introdujeron en el mercado japonés⁷⁰⁴ en el año 2001, y desde entonces, su rendimiento ha ido creciendo rápidamente tal y como muestra la figura 317. En producción simultánea de frío y ACS, el COP de estas máquinas es ya en la actualidad del orden de COP = 8. El gobierno Japonés se encuentra inmerso en una gran campaña de promoción de este equipo que es de esperar que haga crecer de forma muy rápida el número de unidades instaladas, activando el mercado incluso fuera de las fronteras de Japón.

698 Las máquinas aire-aire bombean la energía térmica desde el aire ambiente al aire en el interior del edificio. Las máquinas aire-agua bombean la energía térmica desde el aire ambiente hasta un circuito de agua empleado para distribuir la energía térmica dentro del edificio.

699 Las bombas de calor geotérmicas resuelven este problema sustituyendo el ambiente exterior por el terreno como foco frío, consiguiendo así temperaturas del foco frío significativamente más elevadas en los instantes en que la temperatura ambiente es muy baja.

700 Del orden de -20 °C.

701 Lo cual implica pasar de elementos de distribución convectivos (los comúnmente denominados "radiadores") a otros con predominio radiante (suelo o muro radiante).

702 Agua Caliente Sanitaria.

703 Hasta 90 °C, e incluso con temperaturas exteriores de -20 °C.

704 En Europa, y en concreto en España, la disponibilidad comercial de estos equipos es mucho más baja, pero en los últimos años ya parece que se empieza a activar el mercado.

De cara a la configuración del contexto E3.0 hemos supuesto que el ACS se produce principalmente⁷⁰⁵ mediante bombas de calor aire-agua. En la figura 318 mostramos los valores límite termodinámico del COP de estas bombas de calor, así como los valores máximos que cabría esperar al tener en cuenta los saltos de

temperatura necesarios en los intercambiadores de calor (evaporador y condensador) trabajando para la generación de ACS sin procesos recuperativos. Como podemos apreciar en esta figura los valores límite se encuentran bastante cercanos a los actualmente disponibles en el mercado si el ACS se prepara a 60 °C. Si

Figura 317. Evolución del COP de las bombas de calor de la línea Eco Cute (CO₂ como fluido refrigerante) desde su aparición en el mercado.

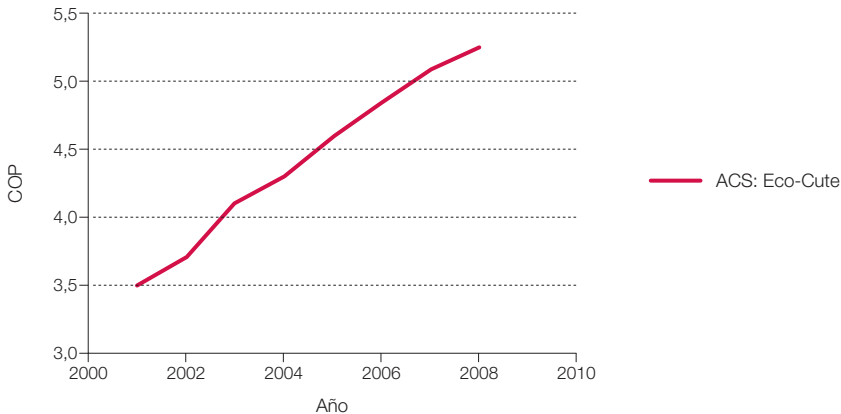
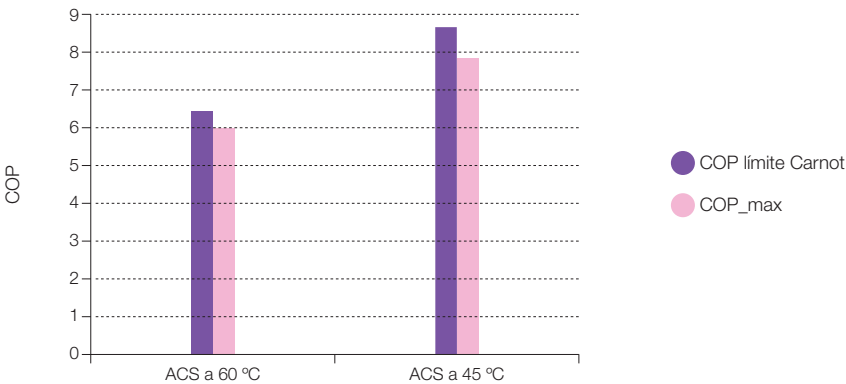


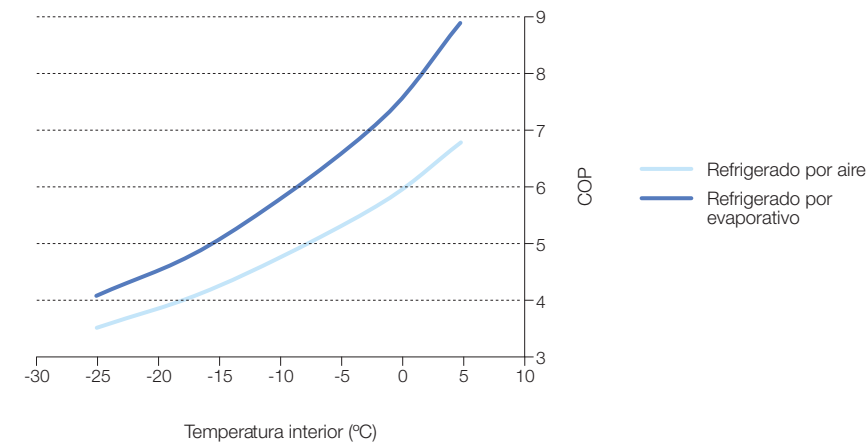
Figura 318. Valores límite termodinámico del COP y valores máximos a alcanzar del COP considerando los saltos de temperatura requeridos para el intercambio de calor en condensador y evaporador, para distintos equipos de generación de ACS.



705 Respecto a la solar térmica, pese a que en el contexto E3.0 pueda resultar más difícil de justificar que en el contexto BAU, dada la contribución que cabe esperar de esta tecnología en el proceso de transición, hemos supuesto que persisten unas coberturas solares para el conjunto del parque de edificios comparables a las del contexto BAU.

reducimos la temperatura de preparación del ACS hasta temperaturas más adecuadas para el uso sin mezcla (45 °C⁷⁰⁶) vemos que todavía existe un potencial significativo de mejora del COP. Pero es más, la capacidad de generar el ACS mediante un proceso recuperativo abre la puerta a la obtención de COP estacionales más elevados que los valores mostrados en esta figura. De forma conservadora hemos asumido un COP = 7 para el contexto E3.0 en la mayoría de las situaciones, si bien este valor se ha reducido a COP = 6,5 en aquellas aplicaciones con baja demanda de frío. Por lo que se refiere a la demanda de ACS⁷⁰⁷, en la mayoría de los casos se ha asumido igual⁷⁰⁸ en el contexto BAU que en el E3.0, y tan solo en aquellos casos en que se ha considerado que la aplicación de medidas de inteligencia pueden conducir a un ahorro en el consumo de volumen de ACS, hemos aplicado una pequeña⁷⁰⁹ reducción en la demanda de volumen de ACS.

Figura 319. COP alcanzable por los equipos de refrigeración como función de la temperatura interior, para una temperatura exterior de 40 °C y humedad relativa del 50%, tanto para el caso del condensador refrigerado por aire como para el del condensador evaporativo.



3.7.6.4.5 Aplicaciones de refrigeración comercial

La refrigeración de alimentos o medicinas es otra de las aplicaciones en las que encontramos las bombas de calor dentro de los edificios⁷¹⁰. En este caso las temperaturas del foco frío vienen condicionadas por los requerimientos de conservación de la sustancia interior, y pueden oscilar entre 2 °C y -25 °C según los casos.

Por otro lado, cuando estos equipos de refrigeración cuentan con condensadores exteriores, como es el caso, por ejemplo, de los supermercados, el proceso de refrigeración de la mercancía genera una carga simultánea de calefacción en la zona donde se encuentra el equipo, motivo por el que los procesos recuperativos cobran importancia.

706 Esta sería la temperatura de trabajo durante la mayor parte del tiempo, dejando para periodos esporádicos el incrementar la temperatura hasta valores más elevados con fines sanitarios.

707 Por lo que respecta al resto del consumo de agua, existe un gran potencial de mejora respecto a la situación actual a desarrollar, tanto mediante la aplicación de elementos de eficiencia (descargas limitadas, aireadores, limitadores de caudal), como por la introducción de elementos de inteligencia (controles de uso), y por la introducción de aguas recuperadas para cubrir parte de la demanda. Sin embargo, sus implicaciones energéticas en términos de energía final en el sector edificación son pequeñas, motivo por el que no se han incluido en el modelo del sector edificación (en el escenario del sector servicios, si que se reflejan algunas de estas implicaciones energéticas).

708 En términos de volumen de agua. Esta es una hipótesis conservadora que presupone que en el contexto BAU para el año 2050 se ha internalizado ya la mayoría del potencial de ahorro de ACS en términos de volumen de agua, de tal forma que la demanda de agua caliente ya se corresponde directamente con la demanda de servicio final, que en principio mantenemos igual en los contextos BAU y E3.0.

709 Del orden de E3.0/BAU = 85%.

710 Estos equipos aparecen tanto a nivel de aplicaciones de refrigeración en edificios terciarios, como en las neveras y frigoríficos de los edificios residenciales. Sin embargo, en este punto tratamos exclusivamente de las aplicaciones comerciales de la refrigeración. Las neveras y frigoríficos de los edificios residenciales quedan incorporados dentro del conjunto de electrodomésticos para reflejar su único impacto energético, que es su consumo de electricidad y la disipación de este consumo eléctrico dentro del espacio en el que se encuentran, pues a diferencia de las grandes aplicaciones comerciales, al tener el evaporador y el condensador de la bomba de calor en el mismo espacio del edificio, no producen efectos térmicos adicionales sobre el espacio en el que se encuentran.

En el contexto BAU vamos a suponer valores del COP de estas bombas de calor del orden de los actuales⁷¹¹. Pero para el contexto E3.0 vamos a explotar el potencial de mejora de estos equipos, tanto en la reducción de demanda de frío mediante la aplicación de sistemas inteligentes que minimicen las ganancias térmicas, como mediante la mejora de los sistemas de iluminación que llevan incorporados, mediante la mejora del rendimiento de los ventiladores y procesos de desescarche, y mediante la introducción de mejoras en los COP de las propias bombas de calor.

Por lo que respecta a los límites del COP que cabría esperar, la figura 319 nos los muestra en función de la temperatura interior del refrigerador para el caso de considerar una temperatura exterior de 40 °C y considerando saltos de temperatura alcanzables en los dos intercambiadores de calor con valores aceptables del área de transferencia.

En el contexto E3.0 no hemos implementado el condensador evaporativo por considerar que el consumo de agua asociado no nos compensaba la mejora en prestaciones energéticas.

Por otro lado, los COP considerados en el caso E3.0 conservan más que los presentados en la figura anterior, al haber considerado unos saltos de temperatura más elevados en los intercambiadores y un acercamiento al límite teórico del orden del 90%.

3.7.6.4.6 Procesos recuperativos

Como hemos comentado más arriba, las bombas de calor, al manejar simultáneamente un flujo de calor con capacidad de refrigeración (evaporador) y otro con capacidad de calefacción (condensador), se prestan a la

implementación de procesos recuperativos en la propia máquina al usar simultáneamente los dos flujos de calor, bien de forma directa (coincidiendo en el tiempo las dos aplicaciones), o bien de forma indirecta mediante la acumulación de uno de los aportes térmicos hasta el momento en que se demande.

Las aplicaciones en las que podemos encontrar esta situación son:

- Producción de ACS en verano, cuando el edificio también demanda refrigeración.
- Simultaneidad de demanda de calor y frío en un mismo edificio. Esta condición puede darse, por ejemplo, en condiciones de invierno en edificios con elevada superficie de fachada acristalada y un nivel elevado de carga interna por equipamientos e iluminación, en los que puede coexistir una demanda de calefacción en las zonas perimetrales con una demanda de refrigeración en las zonas interiores. O bien en ciertas épocas del año en las que a lo largo de un mismo día puede haber demandas de calefacción y de refrigeración (requiere acumulación térmica para cubrir el desfase).
- Aplicaciones de refrigeración de alimentos en un edificio con requerimientos de calefacción.

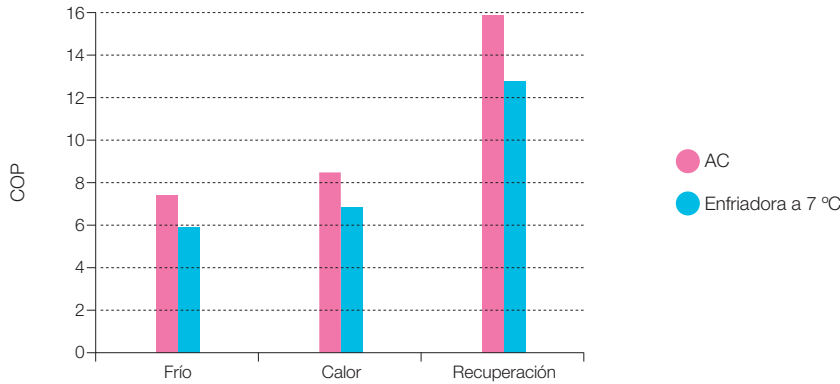
Para ilustrar el potencial de mejora de las aplicaciones de recuperación a nivel de bomba de calor, en la figura 320 presentamos un caso en el que la aplicación de calor demanda⁷¹² 55 °C, y para dos aplicaciones de frío: un acondicionador de aire, y una enfriadora de agua trabajando⁷¹³ a 7 °C. Como podemos observar, en ambos casos la presencia del proceso recuperativo conduce prácticamente a doblar el COP que individualmente se obtiene para cada una de las dos aplicaciones.

711 Que pueden oscilar entre COP = 2,5 para aplicaciones de media temperatura y COP = 1,3 para aplicaciones de baja temperatura.

712 El resultado sería más favorable si la aplicación de calor demandara temperaturas menores.

713 En el caso de que la enfriadora trabajara a 15 °C por haber recurrido a un medio de distribución del frío más favorable, los resultados de la enfriadora serían del mismo orden que los del AC.

Figura 320. Ilustración del potencial de los procesos recuperativos. AC = acondicionador de aire; decremento de temperatura del aire de refrigeración = 10 °C; temperatura de la aplicación de calor = 55 °C.



Por limitaciones de tiempo y capacidad de modelado, la aplicación de procesos recuperativos en los escenarios aquí desarrollados se ha limitado a un cierto porcentaje de recuperación en las aplicaciones de refrigeración de alimentos, y en un pequeño efecto sobre el COP de generación de ACS.

El proceso recuperativo que si que se ha implementado mayoritariamente en el contexto E3.0 y que es independiente del uso de bombas de calor, es el asociado a recuperación térmica del aire de ventilación mediante un intercambiador de calor actuando entre el flujo de aire de extracción y el de admisión.

3.7.6.5 Distribución energía térmica

La distribución de energía térmica implica al medio de distribución, a los rendimientos de los equipos empleados, y a las opciones de procesos recuperativos interzonales.

Respecto a los medios de distribución, las tres opciones son emplear como fluidos

caloportadores el aire, el agua, o el fluido refrigerante de las bombas de calor. En cualquiera de los tres casos, para transportar la energía térmica desde el centro de generación a las distintas zonas del edificio, es preciso incurrir en un gasto energético (ventiladores, bombas o compresores) que dependen tanto de la red de conductos empleada para distribuir el fluido, como de los rendimientos de los equipos empleados para impulsarlo.

Como concepto general, debido a su menor densidad y bajo calor específico, el aire resulta la peor opción para el transporte de energía. Por tanto, en un contexto eficiente conviene limitar el transporte de aire a proporcionar el aporte necesario para cubrir las necesidades de ventilación. En los edificios actuales, este caudal de aire de ventilación es significativamente inferior al requerido para el transporte de energía térmica, pero en un contexto eficiente, la demanda de climatización se puede ver tan reducida que el caudal de aire requerido para cubrir las necesidades de ventilación ya resulte suficiente para satisfacer la demanda térmica,

en cuyo caso ya no sería necesario implementar ningún medio de transporte térmico adicional.

En las situaciones en que el caudal de aire de ventilación no pueda cubrir el total de la demanda térmica, el complemento debería proporcionarse mediante el uso de agua o fluido refrigerante para realizar dicho transporte, en lugar de incrementar el caudal de aire. Estas dos opciones, además de resultar más eficientes por permitir un menor consumo de energía para el transporte del fluido caloportador, habilitan la opción de implementar la recuperación térmica interzonal dentro del edificio, de tal forma que se puedan compensar las cargas simultáneas de calefacción y refrigeración reduciendo la aportación necesaria del equipo de generación. En el caso de emplear agua como fluido caloportador, esta recuperación interzonal se consigue mediante el empleo de bombas de calor (agua-aire o agua-agua) conectadas a un circuito de agua común en el que se realiza la recuperación interzonal. En el caso de emplear el fluido refrigerante, esta recuperación interzonal se consigue mediante cajas de mezcla del fluido refrigerante.

En cualquiera de las opciones (aire, agua o fluido refrigerante), el contexto eficiente implementa sistemas de velocidad variable de tal forma que se reduzca al máximo el consumo asociado al transporte del fluido en condiciones de carga parcial.

De cara a la elaboración del escenario E3.0, dadas por un lado las limitaciones de tiempo para desarrollar los modelos, y debido al impacto relativamente limitado⁷¹⁴ de las diferencias entre estas opciones para el contexto E3.0 gracias a la gran reducción alcanzada en la demanda de climatización, en la mayoría de los casos se han empleado sistemas de distri-

bución por aire. Respecto a la mejora de eficiencia de la distribución del aire, se ha considerado una mejora del rendimiento de los ventiladores⁷¹⁵, una mejora del rendimiento de los motores eléctricos, y una reducción de la caída de presión en los conductos⁷¹⁶.

Adicionalmente, en algunos casos se han mantenido sistemas de velocidad constante, y no se han introducido sistemas de ventilación según demanda⁷¹⁷ por las limitaciones de tiempo para el desarrollo de los modelos. Por tanto, consideramos que existe potencial de mejora respecto al contexto E3.0 que hemos desarrollado, por lo que los resultados presentados deben entenderse como valores conservadores del potencial de ahorro que se puede alcanzar.

3.7.6.6 Aportación solar térmica

La regulación actual (HE4 del CTE), obliga a la implementación de un sistema solar térmico en todos los edificios nuevos, con una fracción solar en la cobertura de la demanda que oscila entre el 30% y el 70% según el emplazamiento climático y el volumen de ACS consumido. Sin embargo, las excesivas vías de excepción que deja abierta la regulación actual han conducido a que la superficie de captadores realmente instalada haya sido considerablemente inferior⁷¹⁸ a la que cabía esperar cuando salió esta regulación en septiembre de 2006. Además, dado que la regulación está estipulada en función de la superficie instalada y no de la aportación real de estos sistemas solares, las contribuciones solares que proporcionan los sistemas instalados son por lo general inferiores a los valores estipulados por la regulación.

Por otro lado, tal y como comentamos en la introducción de este informe, en un contexto

714 O incluso a la carencia de sentido de plantearse otras opciones debido a que el aporte de aire de ventilación es suficiente para cubrir la demanda en la mayor parte del año.

715 Mejora del orden E3.0/BAU = 130%

716 Mejoras del orden del E3.0/BAU = 50% asociadas a la posibilidad de emplear velocidades de distribución significativamente inferiores con el mismo tamaño de conductos como consecuencia de la gran reducción de requerimientos de caudal de aire a impulsar.

717 DCV: Demand Control Ventilation.

718 Realmente hay dos factores principales que han conducido a esta menor superficie instalada respecto a las expectativas. Por un lado, la paralización del sector de la construcción, y por otro lado, de entre aquellos edificios que sí se han construido, la aplicación de excepciones de la HE4 del CTE y la falta de control sobre la aplicación de esta normativa.

E3.0 con el sistema energético integrado y un sistema de generación 100% renovable que proporciona electricidad “residual” procedente de su regulación, y con equipos muy eficientes de producción de ACS a partir de electricidad que introducen en juego la aportación térmica del ambiente⁷¹⁹ (bombas de calor), la inversión adicional en un sistema de energía solar térmica puede quedar menos justificada que en la actualidad⁷²⁰.

Pero dado que en el proceso de transición hacia el contexto E3.0 la energía solar térmica sí que está, y seguirá jugando un papel importante, cabe esperar que en el horizonte del escenario que estamos desarrollando todavía cuente con una participación importante en la cobertura de la demanda. Por este motivo hemos retenido una aportación solar térmica en los escenarios desarrollados, aplicada de igual⁷²¹ forma a los contextos BAU y E3.0.

Según lo anteriormente comentado, la hipótesis empleada ha sido que para el conjunto del parque de edificios, para el año 2050 existirá una capacidad de energía solar térmica para producción de ACS que en media de todo el parque de edificios corresponde a un cierto porcentaje del valor estipulado en la regulación actual⁷²² para los edificios nuevos. El porcentaje implementado ha sido un 50%⁷²³.

3.7.7 Escenario demanda energética

En este punto agrupamos los resultados finales de los escenarios para el año 2050 de demanda energética del sector edificación.

Empezaremos presentando con más detalle los resultados de la tipología de vivienda unifamiliar, pues en ella hemos desarrollado algunos estudios paramétricos que posteriormente se han empleado⁷²⁴ para fijar algunos

parámetros de la envolvente para otras tipologías de edificios en el contexto E3.0.

A continuación presentamos los resultados energéticos correspondientes a las distintas tipologías de edificios empleadas para describir el parque de edificios. En cada tipología de edificio empezamos por mostrar la estructura del consumo energético para dos emplazamientos climáticos extremos (Almería y Burgos), para posteriormente recopilar los resultados, tanto BAU como E3.0, a nivel provincial⁷²⁵.

Finalmente presentamos los resultados agregados del sector edificación para la España peninsular.

Los resultados presentados en este apartado ya descuentan la aportación autónoma de la energía solar térmica para cobertura de una parte de la demanda de ACS.

3.7.7.1 Escenarios BAU y E3.0 modales

3.7.7.1.1. Residencial unifamiliar

Tal y como ya indicamos anteriormente, la tipología unifamiliar está representada por un modelo de edificio de tres viviendas adosadas de dos plantas, por resultar esta la tipología que mejor representa el resto del parque de edificios residencial no constituido por bloques de pisos.

Esta primera tipología de edificio la hemos aprovechado para desarrollar algunos análisis paramétricos destinados a definir y caracterizar las condiciones de operación del contexto E3.0. Idealmente, este tipo de estudios paramétricos deberían desarrollarse para cada tipología de edificio considerada, pues las modificaciones geométricas, de uso, y de

719 La aportación térmica del ambiente que proporciona una bomba de calor, tiene también en esencia su origen en la energía solar.

720 Sin embargo, en el sector industrial veremos que la solar térmica cobra un mayor peso en el contexto E3.0, pues en ese sector encuentra aplicaciones donde ya no tiene la misma competencia directa de las bombas de calor y donde puede desempeñar un papel importante para ahorrar biomasa.

721 Puesto que la regulación actual ya “obliga” a la incorporación de esta tecnología en el sector edificación, y dado el contexto de integración y electrificación del sector edificación, en principio no cabe contemplar grandes diferencias entre el BAU y el E3.0 por lo que respecta a la aplicación de esta tecnología en el sector edificación. Evidentemente el marco regulatorio se puede y debe mejorar mucho para conseguir que se vayan alcanzando los objetivos planificados de despliegue de esta tecnología, pero las modificaciones requeridas (como puede ser el establecimiento de un mecanismo tipo primas a la generación) en principio cabe esperar que ya se desplieguen en el BAU.

722 HE4 del CTE.

723 Hay que recalcar que este porcentaje es sobre todo el parque de edificios en el año 2050, muchos de los cuales ya fueron construidos antes de la entrada en vigor del CTE. Es decir, este valor promedio queda constituido por la contribución de un porcentaje cercano al 100% de la exigencia regulatoria en los edificios construidos según CTE (inferior al 100% porque los edificios construidos hasta la actualidad, en promedio, no incorporan el 100% de esta exigencia ni en proyecto, ni en cuanto a generación real, pero con el paso del tiempo cabe que vaya mejorando), y una contribución mucho más baja pero significativa del resto del parque de edificios, en los que suponemos que los nuevos mecanismos de incentiación de la solar térmica activarán un cierto nicho de mercado.

724 Lo ideal hubiera sido repetir los estudios paramétricos para cada tipología de edificio, pues las modificaciones en la geometría de su envolvente y en las condiciones de uso del edificio conducen a resultados distintos de las condiciones de diseño óptimo para cada uno de ellos. Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo para desarrollar este estudio,

solicitaciones internas conducen a una modificación de los resultados. Sin embargo, las limitaciones de tiempo para el desarrollo de este estudio nos conducen a adoptar como primera aproximación de las condiciones que definen el contexto E3.0 aquella obtenida de los análisis paramétricos desarrollados con la tipología unifamiliar.

La resolución climatológica empleada para desarrollar los estudios paramétricos ha sido la correspondiente a emplear la capital de provincia que considerábamos más representativa del conjunto del parque de edificios para cada una de las zonas climáticas que introduce el CTE. También en este sentido sería más apropiado desarrollar los estudios paramétricos por lo menos con un nivel de resolución provincial, pero las limitaciones de tiempo⁷²⁶ en el marco de este estudio nos han conducido a adoptar la discretización en las 12 zonas climáticas del CTE como una primera aproximación de las 47 provincias de la España peninsular.

El planteamiento E3.0 que desarrollamos para el sector de la edificación pone un especial énfasis en reducir la demanda a nivel local. El resultado es que la demanda de climatización prácticamente se puede anular, y queda dominada la demanda del edificio por los equipamientos internos puesto que la demanda de iluminación también se reduce mucho con las medidas de eficiencia aplicadas. En cuanto a disponibilidad de recurso de energías renovables sería posible cubrir la demanda de los edificios basándose en la generación renovable sin necesidad de apurar tanto la aplicación de medidas de eficiencia a nivel local, pero hay varios argumentos que nos impulsan a considerar como más apropiada la aproximación distribuida asociada a la minimización de la demanda de este sector:

- La disponibilidad de recurso renovable en España es más que suficiente para cubrir la demanda incluso en un contexto BAU para el año 2050 (sin aplicación de medidas de eficiencia adicionales) tal y como mostramos en (GP, 2006). Sin embargo, en el inicio de este informe apuntábamos el hecho de que sin una contracción en el crecimiento de la demanda, llegaría un punto más allá del año 2050 en el cual el recurso renovable disponible ya dejaría de tener la capacidad de cubrir el total de la demanda, y dejaría patente la insostenibilidad de ese modelo de desarrollo incluso si se basa en generación renovable.
- El despliegue de un sistema de generación basado en energías renovables para dar cobertura a una demanda irresponsable conduce a unos impactos ambientales muy superiores a los asociados a la aplicación de medidas de eficiencia que proporcionen una fuerte contracción de la demanda en origen⁷²⁷.
- En el contexto de la integración y electrificación del sistema energético, la ausencia de contracción de la demanda en sectores difusos dominantes como es el caso del sector de la edificación, conduciría a un gran incremento en el requerimiento de infraestructuras de transporte y distribución de energía eléctrica, con unos impactos ambientales importantes.
- El coste de los negavattios correspondientes a la aplicación de medidas de eficiencia en origen, y especialmente en un sector como el de la edificación en el que existe tanto margen de mejora, cabe esperar que por lo general⁷²⁸ resulte inferior al de la instalación de potencia de generación adicional para cubrir esa demanda más las correspondientes inversiones en incremento de capacidad de transporte y distribución.

hemos considerado como buena aproximación la extrapolación de algunas optimizaciones de parámetros de diseño desde la tipología unifamiliar a las otras tipologías de edificios para obtener una primera aproximación conservadora de la estructura energética del parque edificatorio en el contexto E3.0.

725 Por limitaciones de tiempo de cálculo, y dado que en el contexto E3.0 se regulariza mucho la distribución espacial de la demanda de los edificios, en algunas tipologías y tan solo para el contexto E3.0, hemos limitado las simulaciones a una para cada emplazamiento climático CTE distinto dentro de cada CCAA.

726 Estos compromisos asociados al volumen de cálculo implicado, tanto para las tipologías edificatorias como por la discretización climática, se dejan sentir posteriormente con algunos resultados que muestran que la solución adoptada no constituye la óptima. Sin embargo por un lado consideramos los resultados basados en estas simplificaciones como una buena primera aproximación a la caracterización y optimización del parque de edificios en el contexto E3.0, y por otro lado constituye una aproximación conservadora, dejando margen adicional para mejorar el desempeño energético de los edificios al implementar los procesos de optimización con mayor nivel de resolución (idealmente edificio a edificio en el marco de su proyecto).

727 De hecho, algunas de estas medidas de eficiencia tienen más de un impacto ambiental positivo asociado a su implementación. Así, por ejemplo, la aplicación de mayores niveles de aislamiento contribuyen, por un lado, a la reducción de la demanda, y por otro lado, si se emplean los materiales adecuados puede contribuir a reducir el CO₂ atmosférico durante periodos elevados de tiempo.

728 Realmente, la situación que cabe esperar es que la aplicación de medidas de eficiencia resulte menos costosa que el despliegue de capacidad de generación y transporte adicional hasta alcanzar un cierto nivel de eficiencia. Pero debido a que los costes marginales del ahorro se van incrementando al aumentar el nivel de eficiencia, tiene que existir un punto a partir del cual el despliegue de medidas de eficiencia adicionales resulte más caro que incorporar capacidad de generación adicional. En

Originalmente, el proceso de optimización planteado buscaría obtener una primera aproximación a la configuración óptima de la envolvente del edificio, por lo que respecta a la distribución de espesores de aislamiento y fracción de envolvente acristalada que proporcionen un equilibrio entre los requerimientos de climatización y los de iluminación artificial. Sin embargo, el potencial de mejora de la tecnología de iluminación respecto a las tecnologías actualmente dominantes en el sector residencial, junto con las posibilidades de introducir iluminación natural por otros medios que las ventanas o lucernarios⁷²⁹, hacen que, en la práctica, las interacciones entre la iluminación natural y la capacidad aislante de la envolvente sean muy limitadas, y especialmente al aplicar inteligencia a la operación de las ventanas por lo que respeta tanto a su protección frente a ganancias solares como a su capacidad aislante. Por este motivo, la relación de superficie acristalada la hemos mantenido fija en su valor inicial⁷³⁰.

Por lo que respecta al aislante, a lo largo de este informe hemos empleado una conductividad térmica de $k = 0,04 \text{ W/mK}$, como representativa de la mayoría de aislantes actuales en condiciones de uso degradadas, y hemos presentado los resultados de exigencia de aislante como espesores de aislante correspondientes a esta conductividad térmica. Hemos procedido de esta forma para proporcionar una idea de los espesores de aislante requeridos en términos comparables a los que actualmente estamos implementando. Pero el requerimiento de espesor de aislante se reduce de forma directamente proporcional a la conductividad del aislante, de tal forma que en el año 2050 no será preciso recurrir a estos espesores de aislante para obtener el mismo nivel de aislamiento. En efecto, en la actualidad ya contamos con aislantes de $k = 0,02 \text{ W/mK}$ que prácticamente reducen

los espesores necesarios hasta la mitad de los resultados presentados, y con la aplicación de la nanotecnología a los materiales aislantes, en el futuro cabe esperar que podamos disponer de materiales de construcción con menor conductividad térmica.

La función objetivo elegida para la optimización⁷³¹ de los espesores de aislante ha sido la demanda de energía final del edificio en términos de servicios energéticos requeridos, compuesta de los siguientes elementos: demanda térmica para climatización⁷³², demanda de electricidad para iluminación, y demanda de electricidad para equipamiento.

El criterio empleado para elegir el espesor óptimo de aislante⁷³³ en los estudios paramétricos que presentaremos a continuación ha sido el siguiente⁷³⁴: en el caso de que aparezca un óptimo en la función objetivo, el valor correspondiente del espesor de aislante será el elegido, y si la función objetivo presenta una evolución monótona el espesor óptimo será el anterior simulado a aquel que proporciona un ahorro incremental⁷³⁵ inferior o igual a $0,4 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$.

Muchos de los aspectos aquí considerados para configurar el escenario E3.0 en el sector edificación están relacionados con la aplicación de inteligencia al diseño y operación de los edificios. En efecto, los edificios, de igual forma que tienen que dotarse de inteligencia para interactuar con la red eléctrica en el marco de un sistema energético integrado y electrificado apoyado en redes inteligentes, también tienen que aplicar la inteligencia de forma local para gestionar y optimizar su demanda. Son dos ámbitos de aplicación de la inteligencia, que podríamos denominar como interno y de interacción con el entorno, pero que deben ir de la mano para proporcionar el máximo beneficio al sistema energético total.

efecto, el despliegue de medidas de eficiencia está sometido a un proceso de saturación (cada vez hay menos que ahorrar y resulta más caro el conseguirlo), mientras que dado el elevado potencial de generación renovable del que disponemos en relación a la demanda del contexto E3.0, la saturación asociada al despliegue de capacidad de generación adicional (siempre y cuando se use con elevado factor de capacidad mediante la integración en un sistema inteligente) es muy inferior. Como comentábamos anteriormente, en este estudio no hemos acometido el proceso de optimización económica, considerando como buena aproximación del óptimo aquel punto a partir del cual se reducen de forma importante los beneficios energéticos de la medida de eficiencia.

729 Que de cualquier forma ven limitado su alcance a los espacios perimetrales del edificio y a las plantas superiores.

730 Para la tipología unifamiliar se ha empleado un valor del 20% para la superficie acristalada de fachada, algo superior al implementado en la tipología de bloque de viviendas.

731 Como aproximación a la optimización técnico-económica que no hemos acometido en este estudio.

732 Excluyendo por tanto el efecto del rendimiento de los equipos empleados para cubrir esa demanda térmica de climatización. El efecto de los equipos y sistemas de climatización se incorporará posteriormente para evaluar la demanda final total del edificio, actuando por tanto sobre el nivel óptimo de demanda.

733 Es preciso apuntar que los espesores óptimos de aislante mostrados en este informe no deben ser aplicados de forma general a otras situaciones. Los óptimos mostrados tienen validez tan solo desde el punto de vista de las tipologías de edificio, condiciones de uso de los edificios y la finalidad del análisis aquí desarrollado que persigue constituir una primera aproximación a la estructura energética del sector edificación en un contexto E3.0. La optimización del espesor de aislante para otra situación distinta debería apoyarse en un análisis de optimización multivariable dentro de los grados de libertad de diseño del edificio considerado, y particularizado para la geometría y condiciones de uso del edificio analizado. No deben

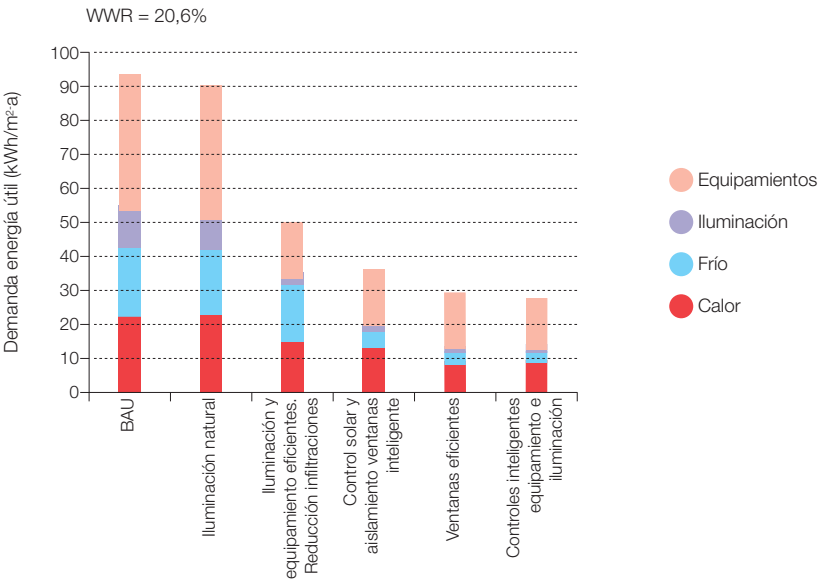
Los niveles de inteligencia “interna” que hemos implementado en las simulaciones son fundamentalmente los debidos a la optimización de la ventilación natural nocturna para refrigerar el edificio, los de gestión de la ventilación a lo largo del todo el año para no generar cargas térmicas posibles de evitar, los de protección solar dinámica de los huecos acristalados según los requerimientos de climatización del edificio, y la aplicación de aislamiento dinámico inteligente en los huecos acristalados. Existen otras medidas asociadas al despliegue de inteligencia que no se han implementado en los modelos por limitación de tiempo y de capacidad de modelado de las herramientas actuales, pero que podrían contribuir a reducir la demanda más allá de los niveles aquí reflejados, como podría ser la modificación dinámica inteligente de las

propiedades termo-ópticas⁷³⁶ de la envolvente opaca del edificio, y la aplicación de inteligencia a la interacción inercial del edificio con el suelo y con el resto de elementos inerciales de los que puede disponer⁷³⁷.

3.7.7.1.1 Efecto diversas medidas eficiencia

Con el fin de proporcionar información cuantitativa del efecto de la introducción de distintas medidas de eficiencia para el contexto E3.0, en la figura 321 presentamos la evolución de la estructura de la demanda de servicios energéticos requeridos para la tipología unifamiliar en la climatología de Madrid al ir introduciendo, de forma sucesiva y acumulada, distintas medidas de eficiencia⁷³⁸

Figura 321. Evolución de la demanda de servicios energéticos requeridos y de su estructura al ir aplicando de forma sucesiva las medidas de eficiencia que caracterizan el contexto E3.0 (WWR representa el porcentaje de superficie de huecos en las ventanas).



extrapolarse los resultados aquí presentados a situaciones distintas, pues los óptimos pueden encontrarse bastante alejados.

734 El proceso de optimización seguido, por limitaciones de tiempo y capacidad de cálculo, ha sido secuencial y no acoplado. Sin embargo, consideramos que el grado de acoplamiento entre las distintas variables consideradas, en el marco de un contexto E3.0, es relativamente pequeño, de tal forma que la optimización secuencial constituye una buena aproximación al óptimo global. Pero el orden secuencial elegido (pared → cubierta → suelo) si que puede tener un cierto efecto sobre la distribución de aislamiento entre los distintos componentes de la envolvente del edificio, desplazando los mayores espesores hacia las paredes.

Los años meteorológicos empleados han sido los correspondientes al proceso de calificación energética de edificios en España, que constituyen la única serie “oficial” de años meteorológicos tipo en nuestro país, lo cual ha hecho que los adoptemos a pesar de las limitaciones que se pueden observar en algunos de estos años meteorológicos. Tal y como comentábamos al principio de este informe, sería recomendable que la administración impulsara el desarrollo de unos años meteorológicos tipo de mayor calidad basados en datos históricos, así como de años meteorológicos para distintos escenarios de cambio climático basados en los resultados regionales de los modelos de simulación del cambio climático.

735 Este es por tanto el criterio de saturación en la rentabilidad energética de esta medida de eficiencia que hemos adoptado como aproximación a la optimización económica. A partir de este punto, seguir incrementando el espesor de aislante conlleva unos costes marginales tan elevados que cabe esperar que resulte más económico el incrementar la capacidad de generación y transporte del sistema de generación eléctrica.

736 Fundamentalmente la reflectividad solar y emisividad infrarroja.

737 Estructura, elementos de acumulación por cambio de fase, etc. Sin embargo, en este caso, el efecto sobre la demanda de la aplicación de inteligencia no cabe esperar que sea importante. Donde sí que resulta relevante este

desde el lado de la reducción de la demanda. Posteriormente, la aplicación de medidas de eficiencia desde el lado de la generación permitirá reducir significativamente la demanda de energía final⁷³⁹ respecto a los valores aquí mostrados. Como podemos observar en esta figura, la demanda de servicios energéticos se llega a reducir por aplicación de medidas de eficiencia en origen hasta llegar a ser del orden de 1/3 de la demanda BAU. Otro elemento a resaltar de estos resultados es la reducción en peso relativo de la demanda de servicios energéticos de climatización, tanto de calefacción como de refrigeración, y eso a pesar de que todavía no se han aplicado los espesores óptimos de aislante que presentaremos en los siguientes apartados. Una vez aplicados los valores óptimos de aislamiento, y si además tenemos en cuenta la elevada eficiencia de los equipos de generación implementados en el contexto E3.0 para cubrir la demanda de servicios energéticos de climatización, resulta fácil entender que en términos de energía final el consumo para climatización en el contexto E3.0 pasa a ser una componente prácticamente despreciable en la estructura energética de los edificios, que en muchas ocasiones pasan a estar dominados por la demanda asociada al uso de equipamientos.

A continuación vamos a presentar los resultados de estudios de optimización del espesor de aislamiento sobre distintos componentes de la envolvente del edificio. Idealmente estos estudios de optimización deberían desarrollarse de forma acoplada entre ellos y con otros elementos de eficiencia del contexto E3.0. Sin embargo, por limitación del alcance del estudio aquí presentado nos limitamos a mostrar una primera aproximación secuencial del proceso de optimización.

3.7.7.1.2 Espesor aislamiento paredes

Como punto de partida de los valores de aislamiento en las paredes, y si tomamos como base la solución constructiva de muro invertido⁷⁴⁰ que vamos a implementar⁷⁴¹ en la tipología de edificio unifamiliar, en la figura 322 recogemos las exigencias de la normativa actual en España (CTE), y las exigencias del estándar 90.1-2004 de ASHRAE implementado en los DOE Benchmarks que, como hemos discutido anteriormente, hemos adoptado como representativo de las condiciones BAU⁷⁴² para el año 2050 según las características del parque actual y de las exigencias normativas sobre la nueva construcción. Como podemos apreciar en esta figura, el estándar adoptado como referencia para el BAU 2050⁷⁴³ es considerablemente más exigente que la normativa actual, por lo que el BAU 2050 que estamos presuponiendo, considerando que representa el promedio del parque edificatorio en el año 2050, implica una considerable mejora respecto a la construcción nueva actual.

A continuación presentamos los resultados del estudio paramétrico sobre el espesor de aislamiento de las paredes⁷⁴⁴ en los distintos emplazamientos climáticos considerados. Los resultados los vamos a presentar en términos de demanda de servicios energéticos de climatización como demanda térmica total⁷⁴⁵, y el punto de partida es el resultante de la aplicación de medidas de eficiencia del contexto E3.0 presentado en el punto anterior⁷⁴⁶. El caso correspondiente al nivel de aislamiento BAU a menudo se puede identificar en las figuras por ser el único número con decimales⁷⁴⁷, y no constituye el menor valor de espesor de aislante considerado tanto para ilustrar la situación actual, como para dar la opción a encontrar óptimos con niveles de aislamiento inferiores a los del contexto BAU. De todas

despliegue de inteligencia es desde el punto de vista de la gestión y respuesta de la demanda a los requerimientos del sistema energético, por lo que su efecto lo incorporaremos al analizar el conjunto del sistema.

738 Como ya comentamos más arriba, algunas medidas pasivas como la forma y orientación del edificio no se han considerado en el desarrollo de los modelos del sector edificación por tres motivos principales: la necesidad de reflejar con un único modelo para cada modo la situación promedio que representa a todos los edificios representados por este modo, la dependencia de cada caso particular por las condiciones de contorno a las que se encuentra sometido (tanto climáticas como del contexto urbanístico), y las limitaciones de tiempo en el marco de este proyecto para optimizar estas variables de diseño. De esta forma, los resultados presentados son conservadores en el sentido de que la optimización proyecto a proyecto de estas variables de diseño pasivo permite alcanzar niveles de demanda inferiores para cada edificio. Por otro lado, otras medidas pasivas como los espesores de aislante, la rotura de puentes térmicos, la inercia térmica, los techos fríos, las ganancias solares, la refrigeración por ventilación nocturna, y los sistemas de protección solar, si que se han incorporado en los modelos, a menudo potenciados por la incorporación de inteligencia.

739 Un ejemplo típico es el de aplicación de bombas de calor para la cobertura de la demanda de climatización, que en un contexto eficiente permiten reducir en el orden de 10 veces (el COP de la bomba de calor) la demanda eléctrica final respecto a la demanda de energía térmica para proporcionar los niveles de confort establecidos (el servicio energético requerido), mediante el aprovechamiento de la energía térmica disponible en el ambiente.

740 El concepto de muro invertido consiste en dejar como capa exterior del muro el aislante, de tal forma que al interior del muro, en contacto con el ambiente interior, quedan las capas inerciales del muro. La ventaja de esta solución constructiva radica en la regulación térmica que proporciona el tener la inercia térmica del muro en contacto con el ambiente interior, lo cual resulta ventajoso tanto en régimen de calefacción como

Figura 322. Espesores de aislamiento (para aislante de conductividad 0,04 W/mK) requeridos por la regulación actual en España (CTE) y por la regulación que hemos adoptado como referencia para definir el escenario BAU (std 90.1-2004 de ASHRAE).

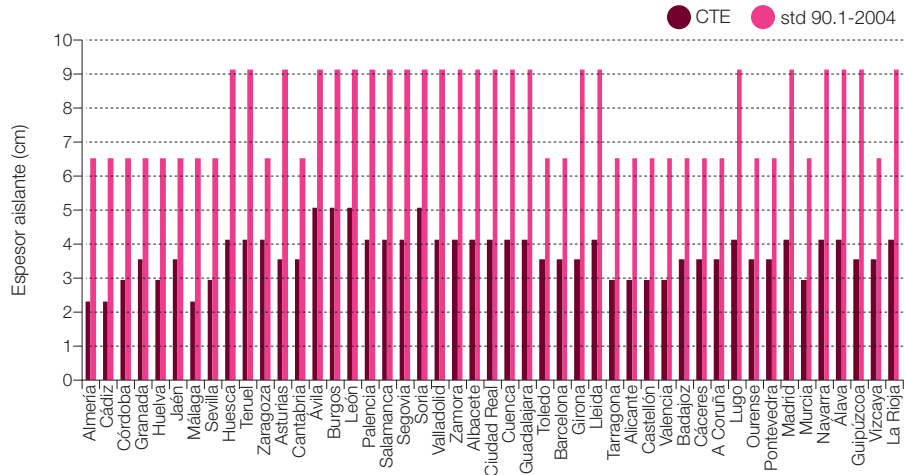
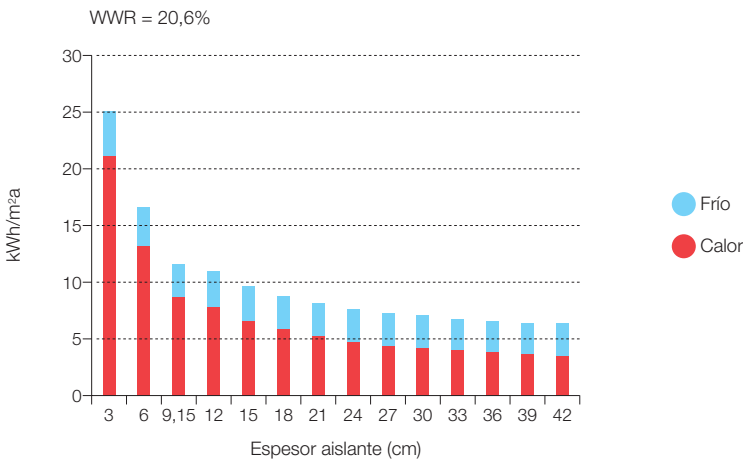


Figura 323. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta y suelo BAU. Madrid (D3). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 24 cm, mientras que el BAU implementa 9,15 cm y el CTE exige 4,13 cm.



formas, los niveles de aislamiento BAU y CTE⁷⁴⁸ aparecen reflejados en los correspondientes pies de figura.

La figura 323 reproduce los resultados para Madrid (zona D3 del CTE). Como podemos observar en esta figura, los niveles de aislamiento

de refrigeración en edificios con ocupación regular, y en el contexto E3.0 proporciona un potencial adicional de participación de la gestión de la demanda en la operación del sistema energético. La solución constructiva dominante en España, coloca la capa aislante cerca del interior del edificio, dejando la mayoría de la inercia del muro en el exterior e inaccesible para la regulación térmica del espacio interior, es decir, desperdicia toda esa capacidad inercial. En (García-Casals X., 2003-2) puede encontrarse una discusión sobre este aspecto y las distintas opciones de cerramiento. Adicionalmente, en el contexto E3.0 consideramos que se ha cuidado la rotura de los puentes térmicos de todos los componentes, y en particular del muro invertido (García-Casals X., 2004-1).

741 Debemos resaltar que el nivel de exigencia del std. 90.1-2004 depende de la tipología constructiva empleada, siendo menor para las construcciones másicas como la que nosotros supondremos para la tipología residencial, que para las tipologías ligeras como las implementadas en el DOE Benchmark de edificio residencial en bloque. Por consistencia dentro del sector residencial, para el BAU 2050 hemos adoptado los valores de aislamiento que el std 90.1 fija para las construcciones ligeras.

742 Es de resaltar que tanto para el BAU como para el E3.0 consideramos que el efecto de los puentes térmicos queda incorporado en los valores del coeficiente U de los distintos cerramientos (el coeficiente U es el que cuantifica la transmitancia térmica específica en régimen estacionario). En el caso BAU esta hipótesis implica un posicionamiento conservador en el sentido de que los valores del coeficiente U que adoptamos a partir de las regulaciones energéticas actuales no incluyen el efecto de los puentes térmicos, por lo que al incluirlo, el valor del coeficiente U del cerramiento sin puente térmico debe ser menor para que el coeficiente U total tenga el mismo valor final.

743 Que era el estándar en EE. UU. para el año 2004.

744 Idealmente la optimización de medidas de eficiencia debería acometerse mediante una formulación multivariable en la que simultáneamente se halle la combinación óptima de medidas de eficiencia, de tal modo que puedan ser retenidas las interacciones

característicos del estándar Passiv Haus tienen sentido en este emplazamiento climático, lo que permite acceder a grandes reducciones en la demanda de servicios de climatización. En este emplazamiento climático, la aplicación de niveles elevados de asilamiento permite

Figura 324. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Almería (A4). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 9 cm, mientras que el BAU implementa 6,53 cm y el CTE exige 2,32 cm.

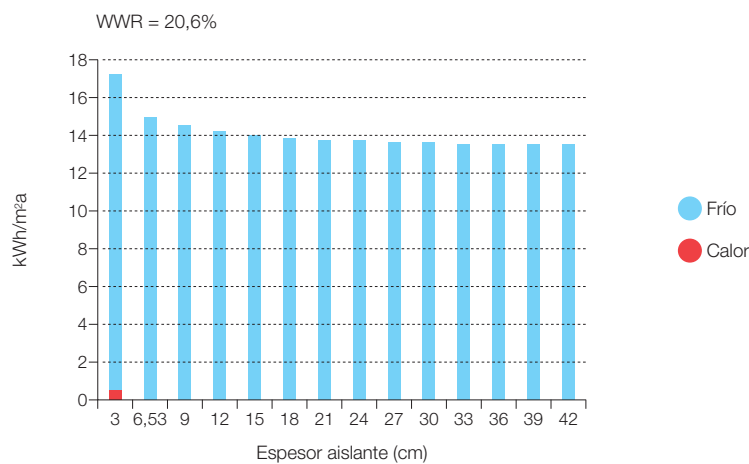
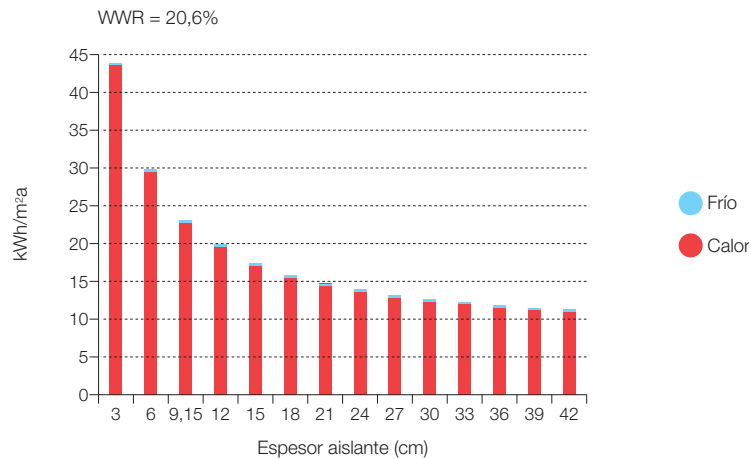


Figura 325. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Burgos (E1). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 33 cm, mientras que el BAU implementa 9,15 cm y el CTE exige 5,08 cm.



entre las distintas medidas de eficiencia y priorizado el despliegue de aquellas con mayor rentabilidad. En el marco de este estudio no hemos acometido esta optimización multivariable y nos hemos limitado a desarrollar algunos estudios paramétricos secuenciales (primero se optimiza una variable y después otra sobre el resultado óptimo de la primera, y así sucesivamente) sobre algunas de las componentes de eficiencia. Por tanto, si bien el resultado óptimo global diferirá del aquí presentado en cuanto a participación relativa de las distintas componentes de eficiencia, en cuanto al nivel de consumo energético final del sector edificación (que constituye nuestra variable objetivo principal), no cabe esperar que haya diferencias significativas.

745 Total de frío y calor, reteniendo así posibles efectos en dirección opuesta sobre ambas demandas.

746 En este sentido conviene recalcar que el edificio en las condiciones actuales ya incorpora bastantes, aunque no todos, los elementos de eficiencia que caracterizan al contexto E3.0. En concreto, el edificio incorpora ya la iluminación y equipamiento interno eficiente e inteligente, los efectos de la iluminación natural, una refrigeración por ventilación nocturna inteligente, un sistema de ventilación inteligente, los acristalamientos eficientes (aunque los marcos de ventana son los del BAU), ventanas inteligentes por lo que respecta a sus mecanismos de protección solar, de ganancias solares, y de asilamiento dinámico, y unas infiltraciones reducidas. Sin embargo, los aislamientos de cubierta son los del contexto BAU, y para el suelo el nivel de aislamiento implementado es el del contexto BAU para el emplazamiento de la zona climática D3.

747 Correspondiente de ajustar los requerimientos del std 90.1-2004 para la solución constructiva implementada.

748 El nivel de aislamiento mostrado en estas figuras como el exigido por el CTE es el que corresponde para alcanzar un valor del coeficiente U (el parámetro que realmente limita el CTE) igual al valor límite estipulado por el CTE con la solución constructiva considerada y el tipo de aislante aplicado.

igualar la demanda de calefacción a la de refrigeración, mientras que tanto en la actualidad, como en el contexto BAU, la carga de calefacción domina la estructura de servicios energéticos de climatización. El espesor óptimo elegido es de 24 cm.

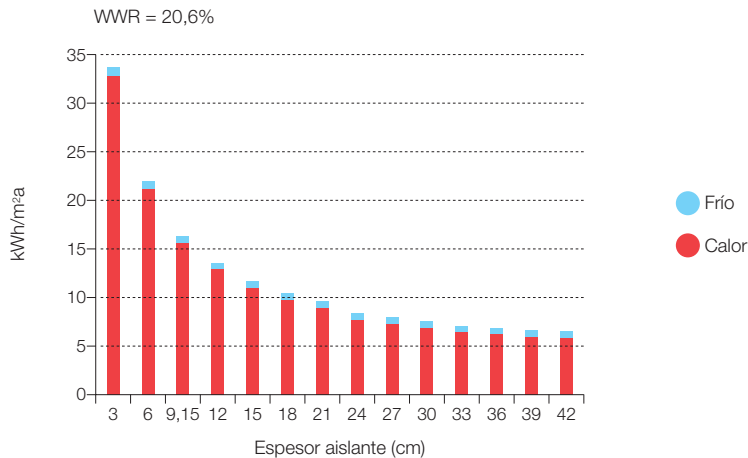
La figura 324 reproduce los resultados para Almería (zona A4 del CTE). Como podemos observar, en este emplazamiento climático de elevada severidad climática de verano, el efecto del aislamiento es mucho más limitado, de tal forma que no tiene sentido la aplicación de los niveles de aislamiento del estándar Passiv Haus. También debemos resaltar que el valor asintótico de la demanda de servicios energéticos de climatización es en este emplazamiento del orden del triple de lo que obtuvimos para Madrid. De forma general podemos concluir que la demanda de frío es más difícil de combatir⁷⁴⁹ por medios pasivos o aplicación de inteligencia que la de calor, elemento a tener en cuenta considerando que las

tendencias de cambio climático nos conducen a un endurecimiento de las condiciones de climatización en temporada de verano y a una relajación en temporada de invierno. El espesor óptimo elegido es de 9 cm.

La figura 325 reproduce los resultados para Burgos (zona E1 del CTE). En este emplazamiento de elevada severidad climática de invierno, la aplicación de niveles de aislamiento del orden de los empleados en el estándar Passiv Haus permite reducir del orden de 4,5 veces la demanda de servicios energéticos de climatización. La demanda de refrigeración experimenta un ligero incremento con el incremento del espesor de aislante, pero este efecto es totalmente despreciable frente a la reducción en la demanda de calefacción. El espesor óptimo elegido es de 33 cm.

La figura 326 reproduce los resultados para Segovia (zona D2 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 30 cm.

Figura 326. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Segovia (D2). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 30 cm, mientras que el BAU implementa 9,15 cm y el CTE exige 4,13 cm.



749 Es preciso tener en cuenta que estos resultados ya incorporan la aplicación de medidas de inteligencia tanto a la protección solar dinámica de los huecos del edificio, como de la ventilación inteligente para sacar el máximo provecho del enfriamiento gratuito. La aplicación de inteligencia a la interacción inercial con el entorno (típicamente a través del suelo) no han sido implementadas y por tanto proporcionan un cierto margen adicional para la reducción de la demanda de servicios energéticos de frío, pero su impacto significativo está acotado a los edificios de pequeño tamaño y gran relación suelo / volumen interior, por lo que no tiene una aplicación general a todas las tipologías de edificio. Otro elemento no incorporado en el modelado es la aplicación de inteligencia a la interacción con elementos inerciales como la estructura del edificio, el uso de materiales de cambio de fase en algunas componentes del edificio, o el empleo de depósitos de acumulación térmica. Sin embargo estos elementos no proporcionan potencial para reducir la demanda de servicios energéticos de climatización, sino tan solo a desplazarla temporalmente proporcionando mayor margen para la gestión y respuesta de la demanda en la integración con el sistema energético, por lo que su consideración ya será recogida más adelante al analizar estos aspectos.

Figura 327. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Pamplona (D1). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 27 cm, mientras que el BAU implementa 9,15 cm y el CTE exige 4,13 cm.

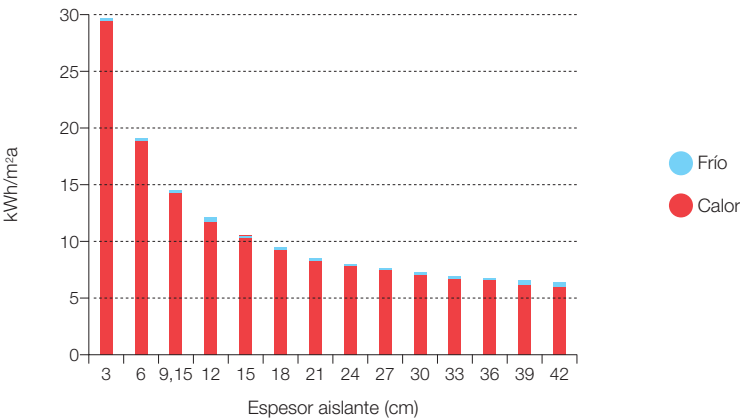
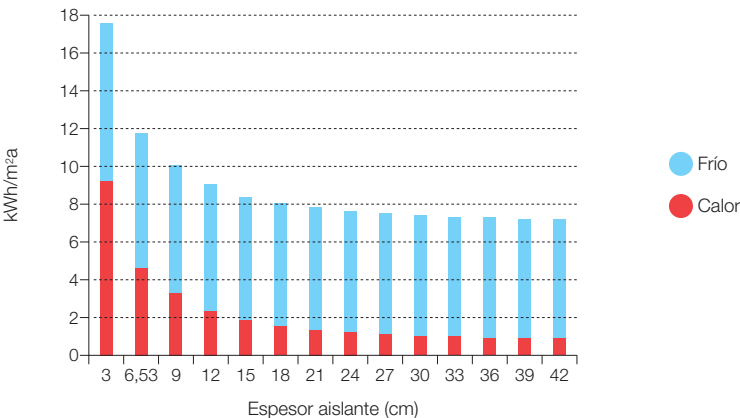


Figura 328. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Badajoz (C4). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 15 cm, mientras que el BAU implementa 6,53 cm y el CTE exige 3,54 cm.



La figura 327 reproduce los resultados para Pamplona (zona D1 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 27 cm.

La figura 328 reproduce los resultados para Badajoz (zona C4 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 15 cm.

Figura 329. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3.Granada (C3). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 18 cm, mientras que el BAU implementa 6,53 cm y el CTE exige 3,54 cm.

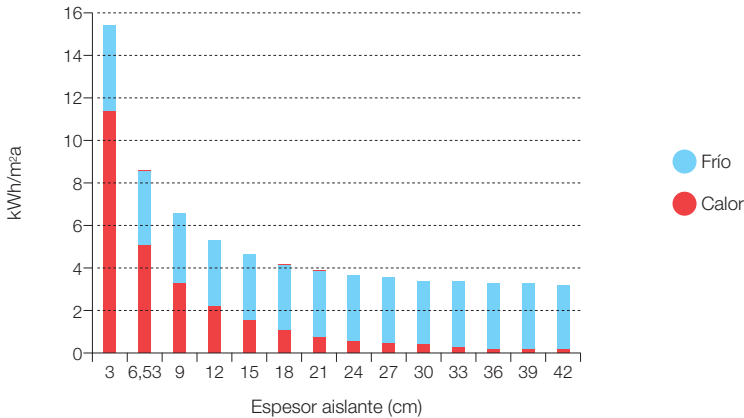
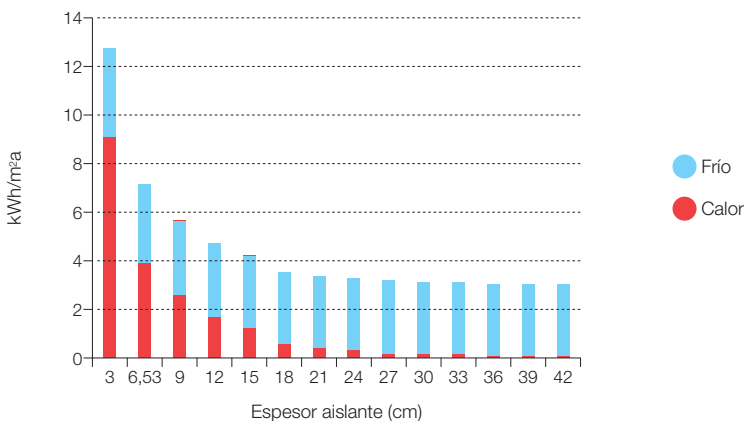


Figura 330. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Barcelona (C2). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 18 cm, mientras que el BAU implementa 6,53 cm y el CTE exige 3,54 cm.



La figura 329 reproduce los resultados para Granada (zona C3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 18 cm.

La figura 330 reproduce los resultados para Barcelona (zona C2 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 18 cm.

Figura 331. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Bilbao (C1). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 24 cm, mientras que el BAU implementa 6,53 cm y el CTE exige 3,54 cm.

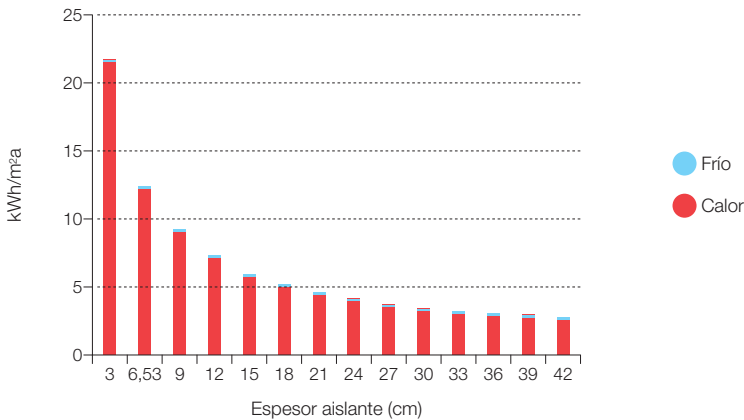
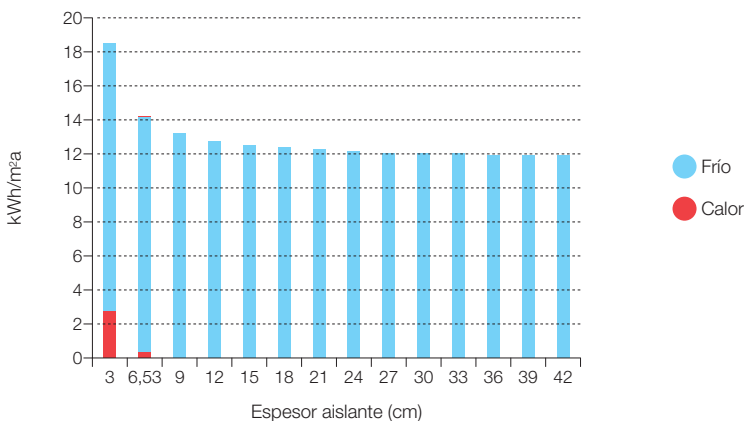


Figura 332. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Sevilla (B4). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 12 cm, mientras que el BAU implementa 6,53 cm y el CTE exige 2,94 cm.



La figura 331 reproduce los resultados para Bilbao (zona C1 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 24 cm.

La figura 332 reproduce los resultados para Sevilla (zona B4 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 12 cm.

Figura 333. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Valencia (B3). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 9 cm, mientras que el BAU implementa 6,53 cm y el CTE exige 2,94 cm.

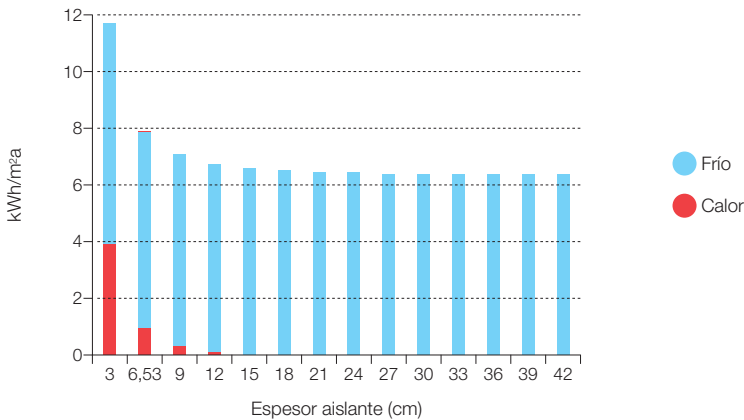
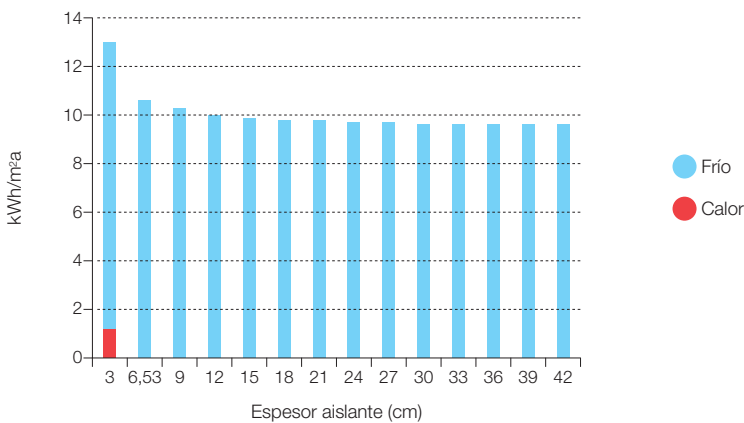


Figura 334. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de las paredes sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Cubierta BAU. Suelo BAU para zona D3. Málaga (A3). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 6,53 cm, mientras que el BAU implementa 6,53 cm y el CTE exige 2,32 cm.



La figura 333 reproduce los resultados para Valencia (zona B3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 9 cm.

La figura 334 reproduce los resultados para Málaga (zona A3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 6,53 cm⁷⁵⁰.

750 Este valor con decimales corresponde a que el valor óptimo elegido se corresponde con el valor BAU.

Figura 335. Comparativa entre los distintos niveles asintóticos de la demanda de servicios de climatización a la que nos conduce la aplicación de aislamiento ($k = 0,04$ W/mK) en las paredes.

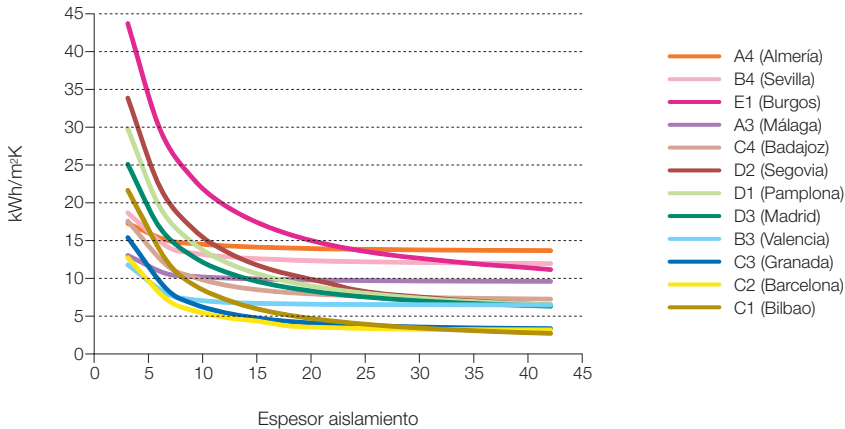
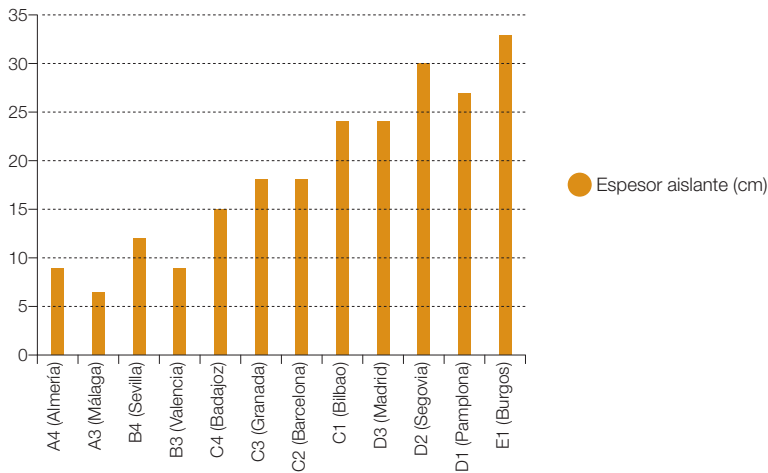


Figura 336. Agrupación de los espesores óptimos de aislante ($k = 0,04$ W/mK) de la pared adoptados para cada emplazamiento climático.



Para apreciar mejor los distintos valores asintóticos, de la demanda de servicios de climatización a los que nos conduce la optimización del aislamiento en los distintos emplazamientos climáticos, la figura 335 nos muestra los resultados agrupados. Como podemos observar, el efecto del aislamiento es mucho

mayor en climas fríos: en climas que quedan dominados por la demanda de refrigeración, el aislamiento no es perjudicial pero no reporta beneficios tan significativos. Excepto los climas muy fríos (como el E1), el añadir aislamiento hasta los niveles del contexto E3.0 hace que los emplazamientos actualmente

con mayor demanda pasen a ser los de menor demanda, y en cualquier caso las demandas finales son parecidas en todos los emplazamientos. Incluso en el emplazamiento de mayor demanda de calefacción (E1), al añadir aislamiento hasta el nivel E3.0 se quedan con una demanda total de servicios de climatización inferior a la del emplazamiento de mayor demanda de refrigeración (A4). Si a esto le añadimos los efectos de modificación del clima, queda claro que la demanda de refrigeración pasará a ser la dominante.

En la figura 336 recogemos los valores óptimos elegidos para el aislamiento de las paredes y que aplicaremos al resto de tipologías de edificios en el contexto E3.0.

3.7.7.1.1.2.1 Sobre la economía del ahorro

Como ya hemos comentado anteriormente, en este estudio no hemos abordado de forma general el análisis de las condiciones óptimas desde el punto de vista económico para el despliegue de las medidas de eficiencia. Sin embargo, en este punto, y aprovechando los resultados del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante en las paredes del modelo de edificio unifamiliar, hemos querido detenernos a bucear un poco en las cuestiones relacionadas con la economía del ahorro, para ubicar y justificar la aproximación que hemos empleado para aproximarnos a estas condiciones óptimas en la definición del contexto E3.0.

El despliegue de medidas de eficiencia para generar ahorro, o lo que se ha dado en denominar negavativos⁷⁵¹, tiene un coste asociado, al igual que la generación de energía para cubrir el consumo que hubiera existido en ausencia de la aplicación de medidas de eficiencia. Es bastante común encontrar la

percepción de que el negavatio siempre va a resultar más económico que generar la forma de energía final para dar cobertura a la ausencia de esa aplicación de eficiencia, lo cual se materializa con la afirmación común de que *la energía más barata es la que no se consume*. Y esto, en principio cabe esperar que sea cierto en un amplio intervalo del potencial de ahorro que pueden proporcionar las medidas de eficiencia, pues los desarrollos asociados a la infraestructura de generación, transporte y distribución de esa energía requiere de la movilización de una cantidad de recursos superior en términos relativos a los necesarios para producir el ahorro en el punto final de consumo. Pero hay dos aspectos que pueden invalidar esta conclusión:

- La aplicación de medidas de eficiencia está sujeta a un proceso de saturación, de tal forma que para una cierta medida de eficiencia a medida que se va incrementando el ahorro producido, crece de forma significativa el coste marginal de los negavativos adicionales.
- En el caso de un sistema de generación integrado, inteligente y basado en renovables, algunos de los vativos generables resultan siempre más económicos que los negavativos correspondientes a intentar evitarlos. Pongamos por ejemplo la electricidad “residual” procedente de requerimientos de regulación del sistema basado en renovables. Su generación no tiene asociado ningún coste adicional ni en infraestructuras ni en operación, y cualquier medida de eficiencia, destinada a evitar este consumo tendrá un coste que por pequeño que sea no será nulo. Esto no quiere decir, ni mucho menos, que la generación del sistema renovable pueda resultar más económica que la aplicación de las medidas de eficiencia, sino más bien, que la gestión y respuesta de la

⁷⁵¹ Se denomina *negavatio* al consumo que no se produjo como consecuencia de la aplicación de medidas de eficiencia. En rigor, tendríamos que hablar de negavativos-hora por tratarse de una medida de la energía (y no la potencia) que no se consumió, en contraste a los vatios-hora que se hubieran consumido en ausencia de la aplicación de las medidas de eficiencia. Sin embargo, por brevedad y para ajustarnos a la nomenclatura coloquial más habitualmente empleada, mantendremos el término *negavatio* para referirnos a la unidad de energía del ahorro. Y por contraposición, a veces hablaremos del vatio asociado al negavatio, abusando del lenguaje para referirnos a una unidad de energía en términos de potencia.

demanda integrada en el sistema energético puede resultar más económica que la aplicación de ciertas medidas de eficiencia.

De forma general, tal y como hemos expuesto detalladamente en puntos anteriores de este informe, el planteamiento que hemos seguido en el despliegue de medidas de eficiencia es el de implementarlas hasta el punto en el que empieza a saturarse su beneficio en términos energéticos, con la idea de fondo de que deberíamos intentar acotar el sistema energético del año 2050 dentro de las capacidades del gran despliegue de infraestructuras que ya tenemos implementadas, con el fin de producir una gran multiplicación de los impactos asociados al despliegue de estas infraestructuras. Esto es especialmente cierto en un contexto de electrificación del conjunto de los sectores energéticos, y en particular del sector edificación: en ausencia de un importante despliegue de medidas de eficiencia esta situación nos conduciría al requerimiento de implementar infraestructuras de transporte y generación a una escala muy superior a la actual, incurriendo en impactos ambientales y económicos que consideramos se deben evitar.

Bajo estos planteamientos generales, en este punto hemos querido profundizar en la cuantificación de estos aspectos para el caso particular de la medida de eficiencia asociada a incrementar el espesor del aislamiento de las paredes del modelo de edificio unifamiliar en la zona climática D3, aprovechando también para ilustrar algunos aspectos asociados a la falta de idoneidad de la estructura tarifaria actual para incentivar el despliegue de medidas de eficiencia.

Por tanto, el caso de partida es el del modelo de edificio unifamiliar con el despliegue del contexto E3.0 que considerábamos para el análisis paramétrico del espesor de aislante

de las paredes en el punto anterior. Es decir, se trata de un edificio ubicado en Madrid, con niveles de aislamiento en cubierta y suelo correspondientes a la situación BAU, al igual de los marcos de las ventanas, pero que incorpora ya toda una serie de elementos del contexto E3.0: iluminación y equipamientos interiores eficientes e inteligentes, iluminación natural, ventilación natural inteligente, ventanas eficientes e inteligentes con controles solares y térmicos dinámicos y bajas infiltraciones. Se trata, por tanto, de un edificio en el cual el consumo eléctrico se ha reducido ya mucho por aplicación de medidas de eficiencia en iluminación y equipamientos, aspecto que junto a la estructura tarifaria y el clima considerado (Madrid) influirán en el reconocimiento del ahorro económico por reducción de la demanda de refrigeración.

Por lo que respecta a la estructura tarifaria considerada para este análisis, hemos optado por emplear la estructura tarifaria actual para ilustrar algunos aspectos relacionados con su falta de sensibilidad para incentivar medidas de eficiencia.

Para la electricidad hemos empleado una tarifa actual para una potencia contratada⁷⁵² por encima de 10 kW y para la cual ya no existe por tanto tarifa de último recurso y debe buscarse directamente en el mercado. El término de potencia de la tarifa considerada⁷⁵³ es de 30,39 €/kW-a y el de energía de 14,3143 c€/kWh, con una potencia contratada⁷⁵⁴ de 14 kW. A estos valores hay que añadirles de forma secuencial el impuesto sobre electricidad (4,86%) y el IVA (18%) para recoger el coste total para el usuario.

Un elemento importante a resaltar sobre esta estructura tarifaria es lo alejada que se encuentra de la incentivación de medidas de eficiencia. En efecto, tal y como nos muestra la

⁷⁵² El modelo de edificio considerado, recordemos que representa a tres viviendas adosadas. Para simplificar, y por el interés de reflejar las tarifas que se encuentran en el mercado, hemos considerado un único contrato de suministro para todo el edificio.

⁷⁵³ Se trata de una tarifa real existente en el mercado en el momento de redactar este informe (10/2010).

⁷⁵⁴ Para el conjunto de las tres viviendas.

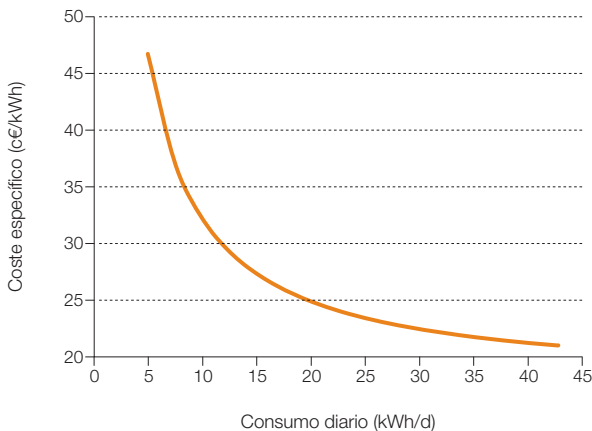
figura 337, el coste específico de la electricidad para el usuario final experimenta un gran incremento exponencial a medida que se reduce el nivel de consumo (es decir: a medida que se aplican medidas de eficiencia), de tal forma que lejos de valorarse positivamente la aplicación de medidas de eficiencia, éstas se penalizan económicamente al diluir el potencial de ahorro con el incremento del coste específico. Para el caso del edificio considerado, que en el contexto BAU tenía una demanda de electricidad de unos 42 kWh/d y que con las medidas del contexto E3.0 implementadas hasta este punto tiene una demanda de unos 13 kWh/d, el coste específico pasa de los 21 c€/kWh para el BAU a unos 29 c€/kWh en la condición actual, y con una tasa muy creciente del coste específico al aplicar medidas de eficiencia adicionales como es el caso de la reducción de la demanda de refrigeración a la que afecta la aplicación de mayores niveles de aislamiento. En estas condiciones, claramente quedan desincentivadas, desde un punto de vista económico por la estructura tarifaria actual, las

medidas dirigidas al ahorro adicional en el consumo de energía eléctrica.

Por otro lado también conviene apuntar los elevados valores que ya alcanza el coste específico de la electricidad para el usuario, de tal forma que en el caso de aplicar medidas de eficiencia significativas, fácilmente sube por encima incluso de la tarifa regulada para la solar fotovoltaica en la edificación⁷⁵⁵.

Uno de los elementos principales que conduce a esta estructura tarifaria tan desincentivadora de las medidas de eficiencia es el elevado coste del término de potencia fijo. En efecto, este término va en función de la potencia contratada, y no de la potencia máxima demandada, de tal forma que penaliza fuertemente el coste específico sin que las condiciones de consumo representen ninguna solicitud real adicional sobre el sistema eléctrico. Es más, una potencia contratada elevada resulta ventajosa para el sistema eléctrico cuando se permite⁷⁵⁶ la articulación de medidas de gestión y respuesta de la demanda, pues permite ofrecer

Figura 337. Coste específico de la electricidad con la estructura tarifaria considerada (representativa de un contrato de más de 10 kW que en 2010 ya tenía que estar en mercado libre) en función del consumo diario del conjunto de las tres viviendas adosadas.



755 Esta tarifa se estableció, a partir de septiembre de 2008, en 34 c€/kWh para instalaciones de menos de 20 kW situadas en edificios. Dicha tarifa, al quitarle el 1 c€/kWh que hay que pagar por concepto de representación en mercado (a una energía con tarifa regulada), se queda en 33 c€/kWh. A su vez, la tarifa inicial se ha ido reduciendo progresivamente a lo largo de 2010 (año al que nos referimos para el ejemplo desarrollado en este capítulo), hasta quedar en 0,305869 c€/kWh.

756 Se permite tanto desde el punto de vista legal, como desde el punto de vista económico al articular una retribución a la prestación de este servicio complementario.

una mayor cantidad de servicios complementarios al sistema eléctrico.

Por tanto, para que la estructura tarifaria actual evolucionara hacia un contexto E3.0 inteligente, algunos de los elementos que podría incorporar serían los siguientes elementos:

- Eliminar la penalización a las medidas de eficiencia por el término de potencia fijo relacionado con la potencia contratada que conduce a un incremento exponencial del coste específico al reducir el consumo. En su lugar establecer una tarificación del término de potencia en función de la potencia realmente demandada y de su relación horaria con los requerimientos del sistema eléctrico, y muy especialmente con la capacidad de generación de la potencia renovable instalada en el sistema eléctrico.
- Añadir una retribución a la generación de negativos.
- Introducir un mecanismo de retribución por servicios complementarios (regulación, potencia rodante, e integración de renovables) asociado a las necesidades reales del sistema eléctrico en cada instante de tiempo.

Por lo que respecta a la tarifa de gas natural considerada, corresponde también a una tarifa disponible en el mercado al escribir este informe⁷⁵⁷ para un consumidor doméstico, con un término fijo de 94,08 €/a y un término variable de 4.63 c€/kWh, a los que hay que añadir el IVA del 18%. En estas condiciones, el coste específico para el edificio considerado en las condiciones de aislamiento BAU sería del orden de 7,0 c€/kWh, es decir, unas tres veces más bajo que el de electricidad.

Debe señalarse que la tendencia inmediata que cabe esperar sobre las tarifas de electricidad y

gas natural es al alza respecto a las tarifas empleadas, con incrementos que pueden resultar muy significativos.

Por lo que respecta a los costes de la medida de eficiencia, esto es, el espesor de aislante colocado en las paredes, hemos elegido un material aislante comercialmente disponible con $k = 0,04 \text{ W/mK}$, constituido basándose en viruta de madera termocompactada, apto para la configuración de muros invertidos, y cumpliendo los requerimientos bioconstructivos que señalábamos anteriormente en este informe. El coste considerado es de 300 €/m³, e incluye tan solo el material aislante adicional, pues el resto de elementos para su puesta en obra constituyen unos costes fijos del edificio que se modifican relativamente poco con el incremento del espesor de aislante.

Para los costes de los sistemas de generación de energía destinados a cubrir las demandas de calefacción, agua caliente sanitaria y frío, hemos considerado unos 150 €/kW para una caldera de baja temperatura o de condensación, y 300 €/kW para el equipo encargado de la generación de frío, con unos costes anuales de 150 €/a para la operación y mantenimiento de las instalaciones. Para la caldera se ha considerado una potencia de 35 kW y para el equipo de generación de frío de 8 kW. Es de resaltar que estas potencias se han mantenido fijas, si bien el despliegue de medidas de eficiencia reduce los picos de potencia, por lo que podría sacar un cierto beneficio por reducción de la capacidad. Pero la reducción de los picos de potencia es en este caso limitada, y los factores que determinan la potencia pico están poco relacionados con la incorporación de aislamiento adicional (por ejemplo la demanda de ACS para la caldera), y además, en estos rangos de potencias bajas el coste de inversión específico (€/kW) crece rápidamente al reducir las potencias,

por lo que prácticamente anula el beneficio de reducción de la capacidad.

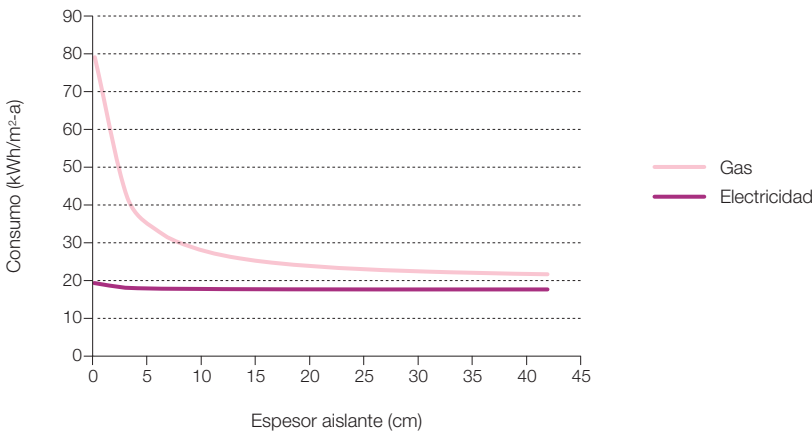
Otros parámetros económicos considerados han sido los siguientes: Vida útil del edificio y periodo de análisis económico = 100 años; vida útil de los equipos de generación = 20 años (por tanto se consideran 4 reposiciones en el periodo de análisis económico); interés del dinero = 1%/a (reflejando los menores tipos disponibles para el usuario de una vivienda); inflación general = 1%/a.

Respecto a las tasas de inflación del gas natural y de la electricidad se han considerado distintas a la tasa de inflación general, al explorarse distintos casos en el estudio realizado. Por lo que respecta a la tasa de inflación del gas natural cabe esperar que resulte elevada y creciente a lo largo del tiempo a medida que vaya aumentando la demanda mundial sobre este escaso recurso. Por lo que respecta a la tasa de inflación de la electricidad, en la media de que dependa de combustibles fósiles con tasas de inflación

crecientes también aumentaría, pero incluso en el contexto BAU su inflación se va a ver amortiguada por la participación de energías renovables en el sistema de generación, por lo que cabe esperar que sus valores de inflación sean inferiores a los del gas. Además, tal y como veíamos anteriormente, el valor de partida del coste específico de la electricidad ya es mucho más elevado que el del gas (del orden del triple), motivo por el que también cabría esperar que su inflación fuera inferior.

En estas condiciones, la figura 338 nos reproduce la evolución del consumo total de gas natural y electricidad del edificio a medida que se incrementa el espesor de aislante en las paredes. Como podemos observar en la figura, el efecto de la incorporación de aislante es mucho más elevado sobre el consumo de gas (afectando a la demanda de calefacción) que sobre el consumo de electricidad (que solo se ve afectado por la reducción de la demanda de refrigeración). También se aprecian los rendimientos decrecientes de la aplicación de

Figura 338. Consumo total de electricidad y gas al ir incrementando el espesor de aislante. Vivienda unifamiliar en Madrid.



medidas de eficiencia por lo que respecta a la reducción incremental del consumo total.

Si relacionamos los ahorros económicos conseguidos por la aplicación de la medida de eficiencia (reducción consumo gas y electricidad) con los costes asociados al despliegue de esta medida de eficiencia, en términos normalizados a lo largo de la vida del edificio, obtenemos la cuantificación del coste del ahorro (coste de los negavativos) recogida en la figura 339. Como podemos observar, para este caso, el coste del negavatio se incrementa de forma aproximadamente lineal con el espesor de aislante incorporado. Es preciso recalcar que en esta figura se presenta el coste acumulado, y no el marginal, por lo que los negavativos considerados para cada valor del aislante son el total obtenido respecto al caso sin aislamiento en las paredes. Los valores del coste normalizado del negavatio son como podemos ver bajos respecto a las estructuras tarifarias de la energía que empleamos para cubrir estas demandas, por lo que fácilmente queda justificado un despliegue de

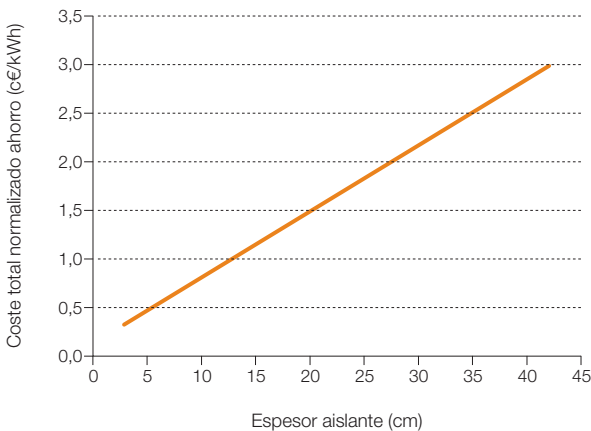
estas medidas de eficiencia hasta alcanzar su condición de saturación.

Otro punto que es importante recalcar es que el coste del negavatio normalizado no se ve afectado por la inflación en general, y mucho menos por la inflación del gas natural o de la electricidad. En un contexto de inestabilidad y tendencia inflacionista de los costes de los combustibles fósiles, esta independencia que proporciona el ahorro de las tendencias inflacionistas constituye un importante valor añadido del despliegue de medidas de eficiencia.

Si comparamos el coste normalizado a lo largo de la vida útil del edificio del suministro de energía (electricidad y gas natural) junto al coste marginal del ahorro, obtenemos el resultado que nos muestra la figura 340, que nos permite extraer varias conclusiones interesantes:

- A medida que aumenta el espesor de aislante se incrementan tanto el coste del suministro de energía como el coste marginal del ahorro. Por lo que respecta al coste marginal del

Figura 339. Coste total normalizado del ahorro. Vivienda unifamiliar en Madrid (Vida útil vivienda = 100 años; interés del dinero = 1%/a).



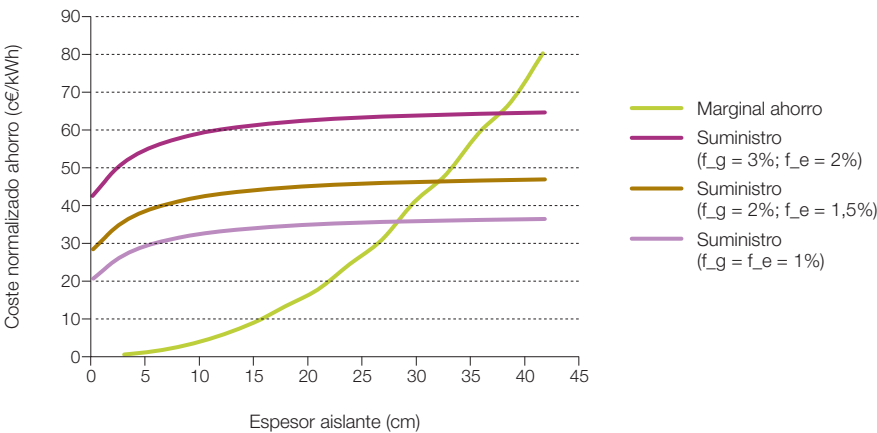
ahorro, este incremento es una consecuencia de la saturación y rendimientos decrecientes en la aplicación de esta medida de eficiencia. Por lo que respecta al coste del suministro el incremento es debido por un lado a la desfavorable estructura de la tarificación energética por lo que respecta a la incentivación del ahorro, y por otro lado a los menores factores de capacidad con los que se usa la inversión en equipos de generación a medida que se incrementa el ahorro.

- El efecto de la inflación sobre el coste normalizado del suministro es muy importante, de tal forma que incluso considerando bajas tasas de inflación como es el caso de la situación reflejada por la figura, llegamos a ver cómo prácticamente se llega a doblar el coste normalizado. Por el contrario, el coste marginal de la aplicación de medidas de eficiencia es independiente de estos procesos inflacionistas.

- Desde el punto de vista de la justificación económica del despliegue de medidas de eficiencia, cualquier situación en que el coste marginal del ahorro quedara por debajo del coste del suministro podría considerarse adecuada. En este sentido, podemos observar por un lado cómo el incremento de la inflación sobre el suministro conduce a la justificación de un mayor despliegue de medidas de eficiencia, y por otro lado podemos ver cómo en todos los casos queda justificado el espesor de aislante que elegimos en el punto anterior⁷⁵⁸ basándose en el criterio de saturación de la capacidad de ahorro de energía.

Pero yendo un paso más allá, tiene interés analizar la evolución del coste total del suministro de energía y la eficiencia (figura 341). Para ello, vamos a considerar que el total de demanda a cubrir es la del edificio con espesor nulo de aislante en las paredes, y parte de

Figura 340. Costes normalizados del total del suministro energético (electricidad y gas) y marginal del ahorro, en función del espesor de aislante, y para distintos valores de la inflación del gas natural y de la electricidad. Vivienda unifamiliar en Madrid. (vida útil vivienda = 100 años; interés del dinero = 1%/a; inflación general = 1%/a; vida útil equipos generación = 20 años).



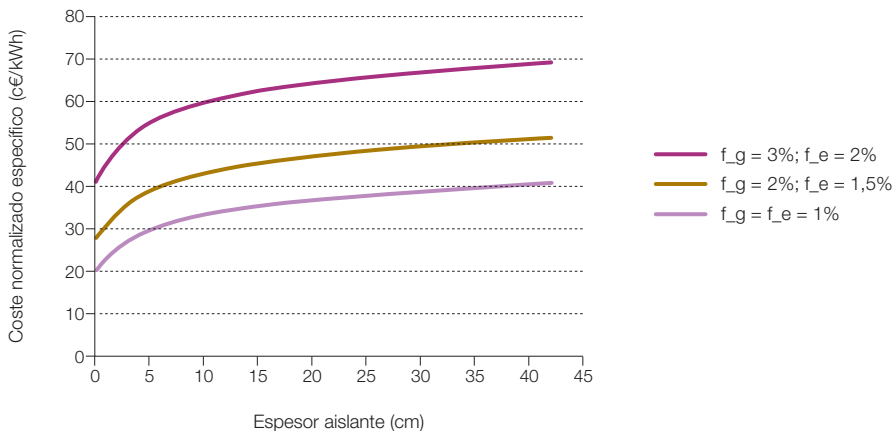
⁷⁵⁸ Para este caso, con el edificio emplazado en Madrid, el espesor elegido fue de 24 cm.

esta demanda se cubre mediante medidas de eficiencia (negavattios) mientras que otra parte se cubre con el suministro de energía. En estas condiciones, el denominador del coste específico (energía total demandada) es constante para todos los valores del espesor de aislante. Tal y como muestra la figura, el coste específico se incrementa con el despliegue de medidas de eficiencia, pero con tasas decrecientes. Esta conclusión tiene carácter general: Al incrementar las medidas de eficiencia crece el coste específico total. Pero en el caso actual este efecto se potencia mediante la existencia de unas estructuras tarifarias que penalizan el ahorro. En el contexto E3.0, la incorporación de medidas de inteligencia en el sistema energético pueden atenuar de forma importante esta tendencia creciente, conduciendo a la estabilización del coste normalizado específico.

Pero realmente no es en términos del coste específico, sino del coste absoluto, que hay

que juzgar la bondad de las medidas de eficiencia sobre el conjunto del sistema, pues a la tendencia de un coste específico creciente con el despliegue de medidas de ahorro hay que superponerle la reducción en el consumo absoluto asociada a este despliegue. La figura 342 nos presenta el resultado para este caso de estudio. Como podemos observar en la figura, la dependencia del coste normalizado total para la cobertura de la demanda de energía del caso original (parte con negavattios y parte con vatios) es tal que presenta un valor mínimo que va creciendo con la inflación a la que estén sometidos los combustibles fósiles. Este mínimo sería el óptimo desde un punto de vista técnico-económico para el despliegue de esta media de eficiencia, y como podemos ver, para el caso de inflaciones del gas natural igual o superior a 3%/a este óptimo es del orden o superior al espesor elegido en el estudio paramétrico desarrollado en el apartado anterior, basándose en la saturación del beneficio energético de

Figura 341. Coste normalizado relativo del total de eficiencia + suministro, en relación a la demanda total (negavattios + vatios), y para distintos valores de la inflación del gas natural y de la electricidad. Vivienda unifamiliar en Madrid. (vida útil vivienda = 100 años; interés del dinero = 1%/a; inflación general = 1%/a; vida útil equipos generación = 20 años).



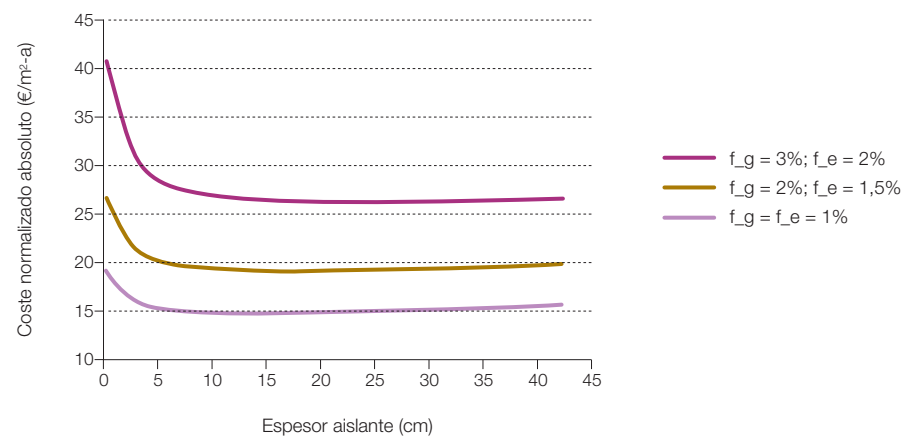
esta medida de eficiencia. Pero es más, a la derecha del mínimo la curva es muy plana, por lo que excederse en la aplicación de la medida de eficiencia no presenta una penalización económica importante, mientras que quedarse corto sí que conduce a una importante penalización económica. Si a esto le añadimos el hecho de que el despliegue de las medidas de eficiencia evita el tener que desarrollar infraestructuras adicionales de transporte y generación de energía, consideramos que la implementación de las medidas de eficiencia hasta el punto de saturación de su capacidad de ahorro queda completamente justificada. Es más, tal y como comentábamos anteriormente, la introducción de inteligencia en el sistema energético conduce a atenuar el crecimiento del consumo específico⁷⁵⁹, lo cual a su vez conduce a allanar más la curva del coste normalizado absoluto a la derecha de su óptimo, desplazando el óptimo hacia mayores valores de ahorro, lo cual refuerza la conclusión anterior

de que más vale pasarse por exceso que quedarse corto por lo que concierne al despliegue de medidas de eficiencia.

Los resultados hasta aquí presentados reproducen el análisis en el ciclo de vida de la medida de ahorro implementada que, a nuestro entender, debe ser el parámetro empleado desde el punto de vista de tomar decisiones sobre el nivel de eficiencia que resulta conveniente desplegar por reflejar el impacto total de dicha actuación⁷⁶⁰.

Sin embargo, debido a la ausencia de inteligencia en el sistema económico actual, las decisiones relativas a la viabilidad de desplegar una medida de eficiencia a menudo se toman en vistas a su rentabilidad en periodos de tiempos menores a los de su vida útil. En el caso de las medidas de ahorro, la limitación de este enfoque, por lo general, conduce a despliegues inferiores del alcance de la eficiencia como consecuencia de dos defectos

Figura 342. Coste normalizado absoluto del total de eficiencia más suministro, en relación a la demanda total (megavatios + vatios), y para distintos valores de la inflación del gas natural y de la electricidad. Vivienda unifamiliar en Madrid (vida útil vivienda = 100 años; interés del dinero = 1%/a; inflación general = 1%/a; vida útil equipos generación = 20 años).



759 Ver discusión asociada a la figura anterior.

760 De hecho, la Directiva 2010/31/UE sobre el desempeño energético de los edificios, impone el requerimiento de que los niveles óptimos de despliegue de medidas de eficiencia correspondan a los óptimos económicos considerando los costes en todo el ciclo de vida.

del método de análisis empleado en el marco del sistema económico actual:

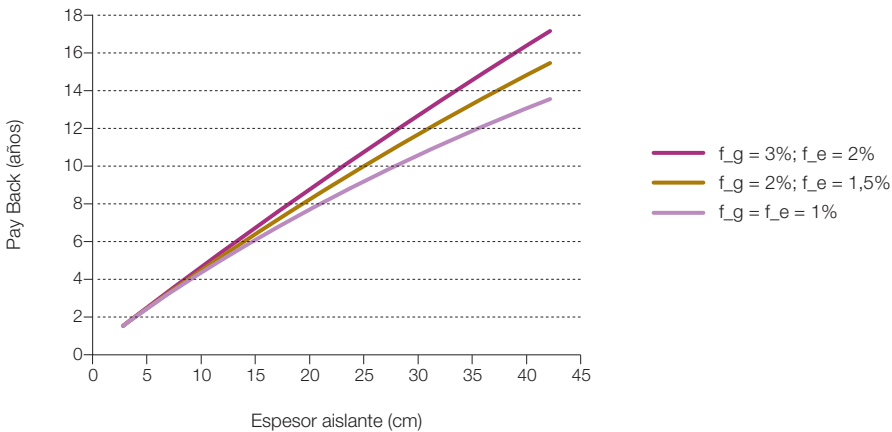
- Los costes actuales⁷⁶¹ de los combustibles a los que sustituye la medida de eficiencia no internalizan ni el conjunto de sus impactos actuales, ni su futura inflación como consecuencia de usar un recurso limitado sobre el que la demanda va a crecer de forma muy importante.
- Se deja fuera del periodo de análisis los ahorros que va a producir la medida de eficiencia en el largo plazo.

Un ejemplo de los indicadores habitualmente empleados para evaluar la viabilidad económica de una inversión es su periodo de retorno o *payback*. En la figura 343 recogemos la evolución del *payback* asociado a la medida de eficiencia considerada (espesor aislamiento pared) en función del espesor de pared implementado para distintos escenarios de inflación de los combustibles. Como podemos observar, en el caso del *payback* no se presenta el efecto de saturación que obteníamos con el

análisis de ciclo de vida, de tal forma que el *payback* se incrementa de forma monótona aunque con tasas decrecientes. La inflación de la energía final, incluso en estos primeros años de análisis, ya se deja sentir de forma significativa, pero la mayoría de su efecto se encuentra en los años posteriores al *payback*, por lo que ese efecto beneficioso de la medida de eficiencia no aparece recogido en este indicador económico de corto plazo. A pesar de todo, los valores obtenidos para el *payback* en los valores óptimos que hemos seleccionado para el espesor de aislante caen dentro de un margen razonable, especialmente en entornos de elevada tendencia inflacionista de la energía.

En este punto hemos analizado los costes del ahorro asociados a una medida de eficiencia muy concreta: la aplicación de aislamiento a las paredes del edificio. Esta es una medida de eficiencia que siempre representa un coste incremental al emplear un material aislante determinado, pues implica emplear una mayor cantidad de este material. Sin embargo, el contexto E3.0 está compuesto por un conjunto de muchas medidas de eficiencia, cada

Figura 343. *Payback* asociado a la incorporación de aislante en las paredes del edificio. Vivienda unifamiliar en Madrid.



⁷⁶¹ Es decir, los que se van a considerar en los primeros años que conforman el periodo de análisis a corto plazo.

una de ellas con costes del negavatio distintos, y algunas incluso con costes negativos del negavatio.

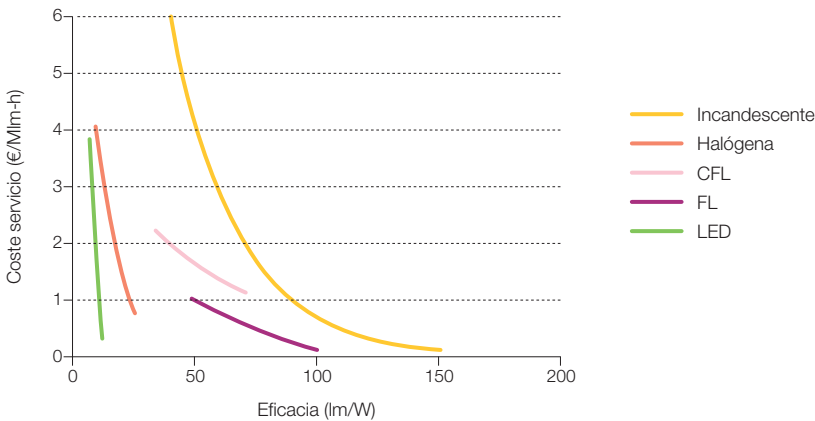
En efecto, consideremos el efecto de las regulaciones sobre el nivel de eficiencia de los equipos. A medida que se va incrementando el requerimiento regulatorio e introduciendo límites para la entrada en el mercado de los equipos menos eficientes, debido al mayor mercado y perspectiva de futuro de los equipos eficientes, su coste puede resultar incluso inferior del de equipos de menor eficiencia⁷⁶², de tal forma que el coste del negavatio sería en este caso negativo.

Esta situación resulta en el sector edificación más común de lo que se pueda pensar en primera instancia. A modo de ejemplo, en la figura 344 reproducimos los resultados de un muestreo de mercado realizado el 1/2010 sobre las lámparas disponibles en grandes superficies comerciales. Los resultados muestran⁷⁶³ el

coste del servicio proporcionado por la lámpara (en términos de euros por cada megalumen-hora proporcionado) en función de su eficacia, para distintos tipos de lámpara. Lo primero que podemos observar en esta figura es el hecho de que para una tecnología de lámpara dada, el coste del servicio se reduce con su eficacia, por lo que el coste del negavatio resulta negativo. Por otro lado, al evolucionar hacia tecnologías más eficientes⁷⁶⁴, también se reduce el coste del servicio, conduciendo a valores negativos del coste del negavatio.

En (Mckinsey & Company, 2009) se presentan resultados de los costes de eliminación de CO₂ de distintas estrategias. Para el sector edificación, más del 70% del potencial de reducción de emisiones de CO₂ para el año 2030 está formado por medidas de coste negativo, que van desde el cambio de lámparas a la rehabilitación energética, pasando por la introducción de equipamiento eficiente y la mejora de los sistemas de climatización y de producción de ACS.

Figura 344. Coste del servicio proporcionado en función de la eficacia para distintos tipos de lámpara. Muestreo de mercado realizado el 1/2010 en grandes superficies comerciales (CFL = lámpara fluorescente compacta; FL = lámpara fluorescente lineal). Para el caso de las lámparas LED el ajuste de los puntos de muestreo se halla extrapolado por encima de 50 lm/W.



762 De hecho, los equipos de menor eficiencia pueden eventualmente desaparecer del mercado, por lo que ya no constituyen una alternativa.

763 Los resultados mostrados corresponden al mejor ajuste de los puntos de muestreo, pero debe indicarse que existe una gran dispersión entre los distintos productos.

764 Por lo que respecta a la tecnología de lámparas LED, debe tenerse presente que en el periodo del muestreo realizado (1/2010) fue cuando estas lámparas empezaron a aparecer en las grandes superficies, con costes muy elevados consecuencia de su bajo mercado, y eficacias muy por debajo de su potencial. De hecho, los productos LED que encontramos en las grandes superficies al realizar el muestreo, frecuentemente no disponían de una caracterización técnica completa, y en cualquier caso su eficacia máxima era del orden de 50 lm/W. En la figura se ha extrapolado el ajuste de los puntos de muestreo para mostrar una posible evolución de esta tecnología al avanzar por su curva de aprendizaje.

En (AIE, 2010) también se incluye alguna información relativa a los costes de ahorro. Para el sector edificación indica que hay un gran potencial de eficiencia a coste bajo. De hecho, los costes totales en ciclo de vida del conjunto de las medidas de eficiencia implementadas en su escenario a 2050 para este sector son negativos a nivel mundial, con unos costes del negavatio que por unidad de energía no llegan al 9% del ahorro económico asociado a la reducción del consumo de combustibles y electricidad. Una de las componentes de eficiencia con mayor coste de las que apunta es precisamente el incremento en nivel de aislamiento de la envolvente, a pesar de lo cual, en la OCDE la rehabilitación energética del parque existente domina el potencial de ahorro energético. La evolución de los estándares sobre los equipamientos hacia valores óptimos de coste mínimo en el ciclo de vida proporciona distintas componentes de eficiencia con costes negativos. De hecho, algunas

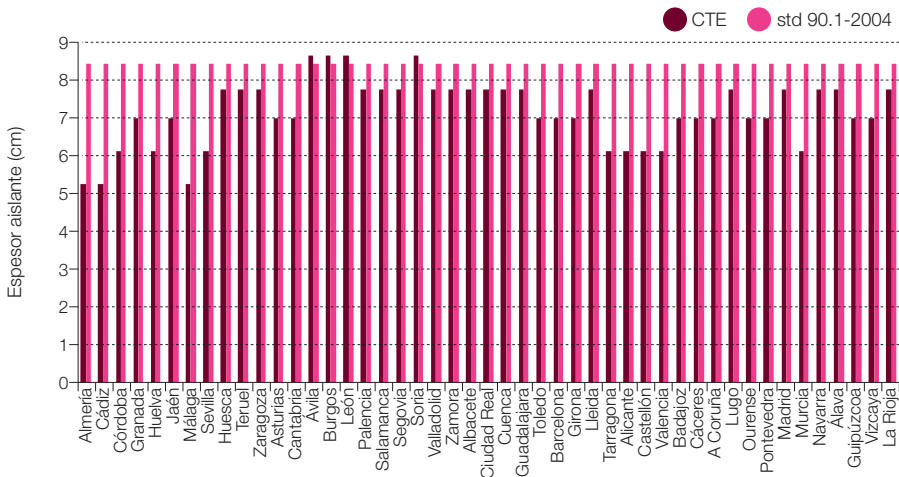
de las tecnologías que dominan el contexto E3.0 como son las bombas de calor, en (AIE, 2010) se muestran proporcionando costes negativos en muchos emplazamientos, entre los que destacan países como Japón que ya han llevado las exigencias regulatorias sobre la eficacia de las bombas de calor a unos niveles de eficiencia muy superiores a los que encontramos en Europa o EE. UU.

Según estos resultados y consideraciones, cabría esperar que el coste medio del negavatio asociado al despliegue de medidas de eficiencia en el sector edificación fuera muy bajo o incluso negativo.

3.7.7.1.3 Espesor aislamiento cubierta

En este punto recogemos los resultados del análisis paramétrico de efecto del espesor de aislante en la cubierta del edificio.

Figura 345. Espesores de aislamiento (para aislante de conductividad 0,04 W/mK) requeridos por la regulación actual en España (CTE) y por la regulación que hemos adoptado como referencia para definir el escenario BAU (std 90.1-2004 de ASHRAE).



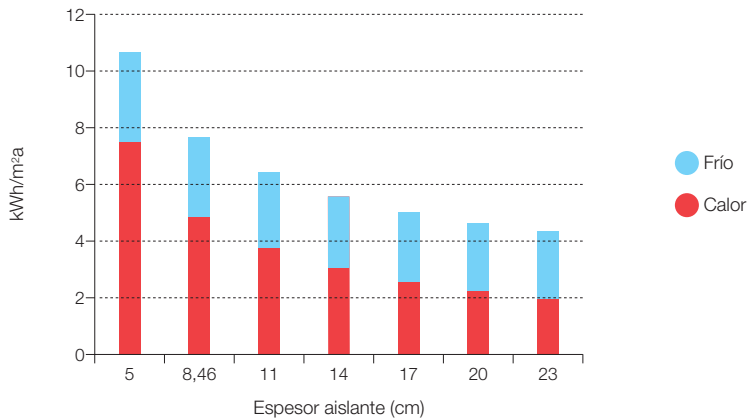
El edificio considerado incorpora las medidas de eficiencia del contexto E3.0 mencionadas en el apartado anterior, así como el espesor óptimo de aislante de pared elegido en el apartado anterior. Además⁷⁶⁵, para este caso se ha incorporado el espesor de aislante BAU para cada emplazamiento climático y se ha analizado la idoneidad de introducir una cubierta fría⁷⁶⁶ en los distintos emplazamientos climáticos⁷⁶⁷.

Como punto de partida, la figura 345 nos recoge los espesores de aislamiento requeridos en las soluciones constructivas implementadas para cumplir con los requerimientos de la regulación actual en España (CTE), y del estándar adoptado como representativo del BAU 2050 (std 90.1-2004). Como podemos observar, para el caso de la cubierta el CTE se encuentra mucho más próximo al std 90.1-2004 que para el caso de las paredes.

La figura 346 reproduce los resultados para Madrid (zona D3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 17 cm.

La figura 347 reproduce los resultados para Almería (zona A4 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 5 cm. Es de resaltar que en este caso el espesor óptimo es inferior al del caso BAU (std 90.1-2004). La diferencia en prestaciones energéticas entre ambos casos es despreciable, pero precisamente por esto carece de sentido desde un punto de vista económico el aumentar el espesor de aislante.

Figura 346. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Madrid (D3). El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 17 cm, mientras el contexto BAU implementa 8.46 cm, y el CTE exige 7,80 cm.



765 Como consecuencia de haber introducido elementos adicionales, hay emplazamientos en los que el punto de los gráficos mostrados en este apartado que representan el valor con aislamiento BAU en cubierta no coinciden con los puntos correspondientes de los gráficos del apartado anterior.

766 Se conoce como cubierta fría aquellos acabados de cubierta con unas propiedades termo-ópticas que reducen la temperatura de equilibrio a la que se queda la superficie al estar irradiada por el sol. Por tanto, el techo frío tiene el potencial de reducir la demanda de refrigeración del edificio, aunque por el contrario reduce también las ganancias por transmisión en régimen de calefacción y por tanto puede aumentar la demanda de calefacción. Por este motivo en algunos emplazamientos resulta beneficioso mientras en otros o no aporta nada o incluso resulta nocivo desde el punto de vista de la demanda térmica del edificio. Las propiedades termo-ópticas que intervienen en la temperatura de equilibrio que adquiere una superficie al recibir la radiación solar son su absorción solar (α_s) y su emisividad infrarroja (ϵ). En ocasiones se emplea un índice que agrupa el efecto de ambas variables sobre el incremento de temperatura, es el denominado Solar Reflectance Index (SRI), que expresa en una escala del 0% al 100% la capacidad de repeler el calentamiento solar de una superficie. El valor del 0% corresponde a una superficie negra, y el del 100% al de una superficie blanca. A modo de referencia, el std 90.1 de ASHRAE (la normativa que hemos usado para definir el BAU) permite sacar crédito en una simulación de una cubierta fría si el material empleado tiene $\alpha_s < 0,3$ y $\epsilon > 0,75$, pero para tener en cuenta la degradación en uso de esta superficie solo permite considerar $\alpha_s = 0,55$, lo cual con una $\epsilon = 0,9$ nos proporciona un SRI = 5,33%. Para el resto de superficies de cubierta, el std 90.1 requiere emplear $\alpha_s = 0,7$. Para el desarrollo de este informe, en el contexto BAU y para aquellos casos del contexto E3.0 que no se beneficien de una cubierta fría, hemos considerado una cubierta con $\alpha_s = 0,7$ y $\epsilon = 0,9$, es decir un SRI = 33,3%, mientras que para los casos del contexto E3.0 que se puedan beneficiar de la cubierta fría hemos supuesto $\alpha_s = 0,3$ y $\epsilon = 0,9$, es decir un SRI = 86,6%.

Figura 347. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Almería (A4). Cubierta fría. El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 5 cm, mientras el contexto BAU implementa 8.46 cm, y el CTE exige 5,27 cm.

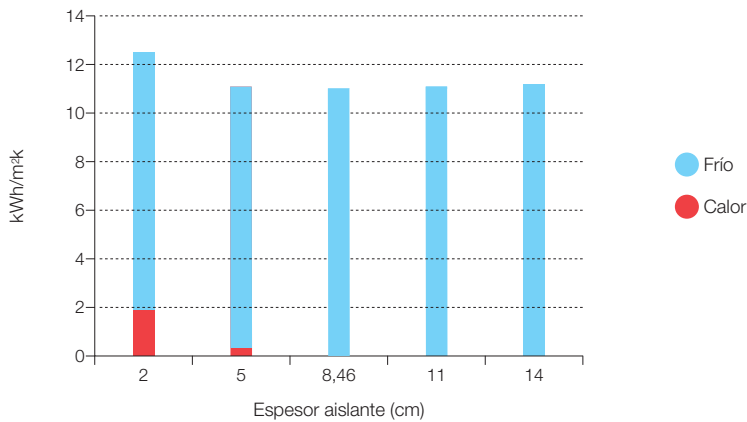
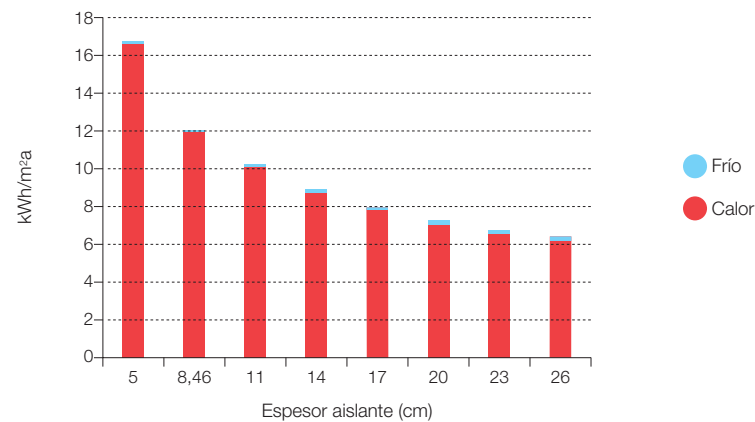


Figura 348. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Burgos (E1). El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 23 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 8,70 cm.



La figura 348 reproduce los resultados para Burgos (zona E1 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 23 cm.

767 En concreto, para los emplazamientos de las zonas climáticas A4, A3, B4, B3, C4, C3 y C2 se ha incorporado el techo frío para el contexto E3.0.

Figura 349. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Segovia (D2). El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 20 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 7,80 cm.

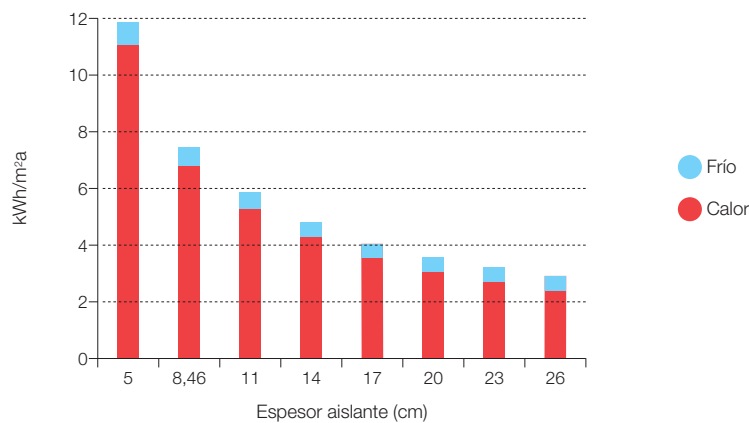
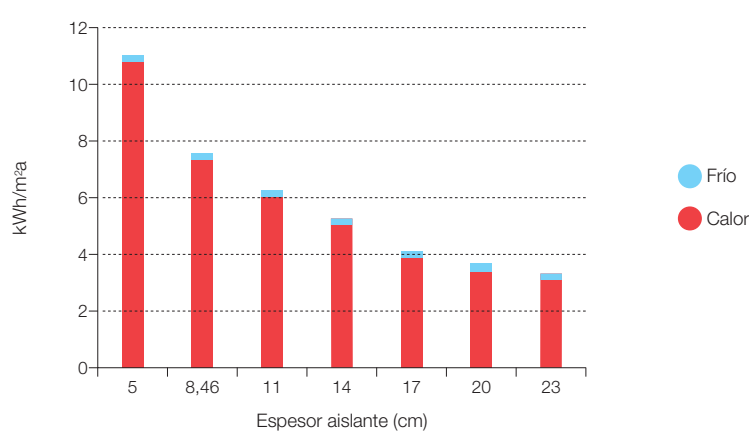


Figura 350. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Pamplona (D1). El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 20 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 7,80 cm.



La figura 349 reproduce los resultados para Segovia (zona D2 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 20 cm.

La figura 350 reproduce los resultados para Pamplona (zona D1 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 20 cm.

Figura 351. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Badajoz (C4). Cubierta fría. El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 14 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 7,03 cm.

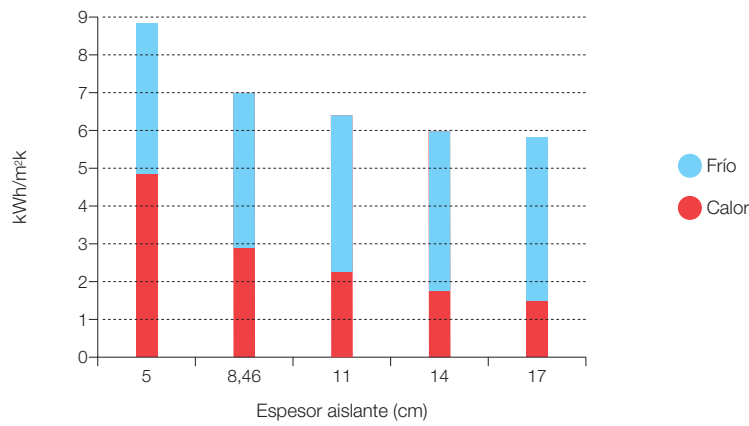
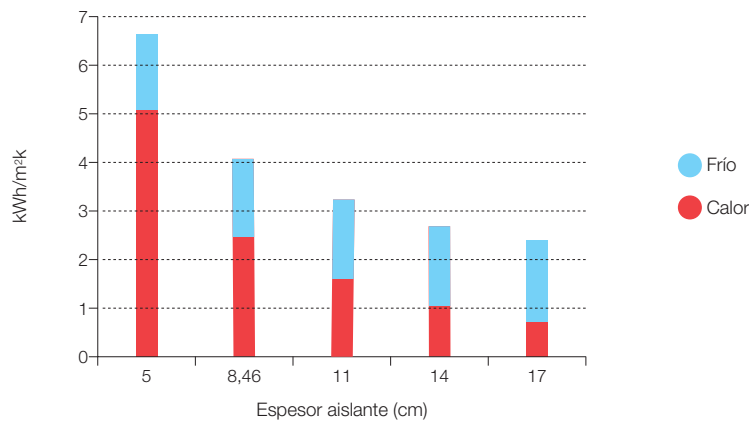


Figura 352. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Granada (C3). Cubierta fría. El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 14 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 7,03 cm.



La figura 351 reproduce los resultados para Badajoz (zona C4 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 14 cm.

La figura 352 reproduce los resultados para Granada (zona C3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 14 cm.

Figura 353. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Barcelona (C2). Cubierta fría. El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 11 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 7,03 cm.

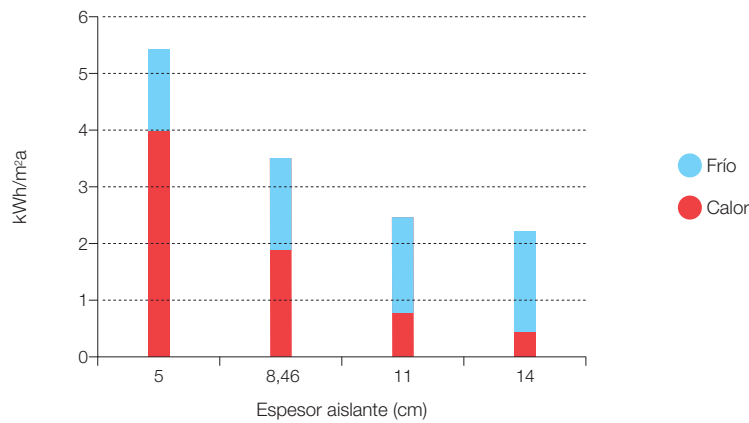
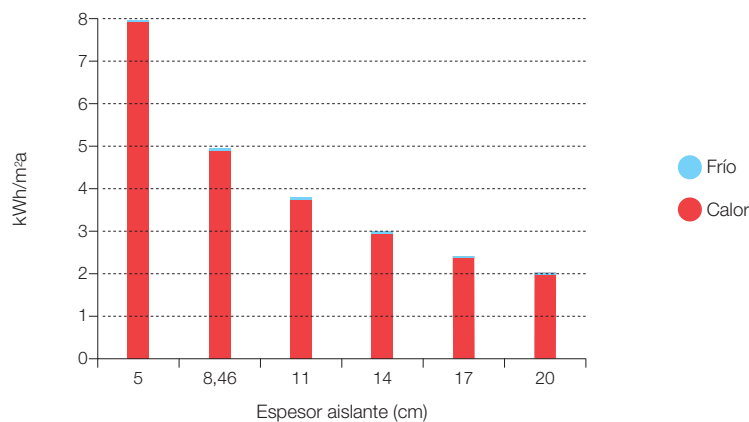


Figura 354. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Bilbao (C1). El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 17 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 7,03 cm.



La figura 353 reproduce los resultados para Barcelona (zona C2 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 11 cm.

La figura 354 reproduce los resultados para Bilbao (zona C1 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 17 cm.

Figura 355. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Sevilla (B4). Cubierta fría. El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 8,46 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 6,16 cm.

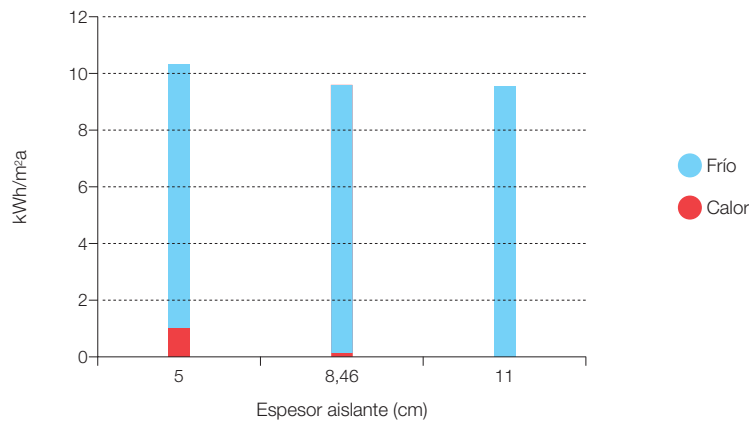
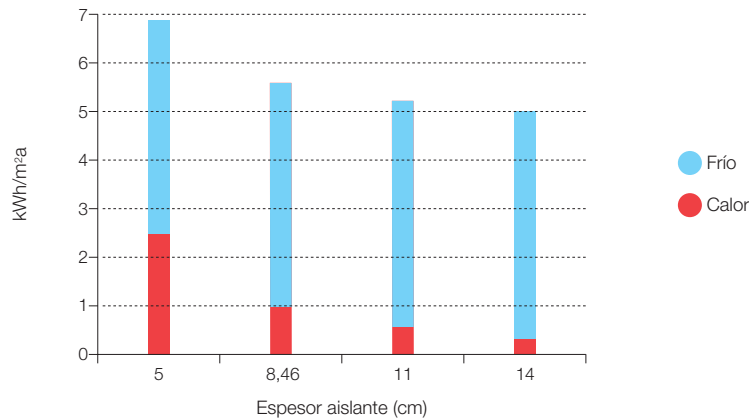


Figura 356. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Valencia (B3). Cubierta fría. El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 8,46 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 6,16 cm.



La figura 355 reproduce los resultados para Sevilla (zona B4 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 8,46 cm⁷⁶⁸.

La figura 356 reproduce los resultados para Valencia (zona B3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 8,46 cm⁷⁶⁹.

⁷⁶⁸ Este valor con decimales corresponde al caso BAU, ajustado para cumplir con el requerimiento del std 90.1-2004 con la solución constructiva implementada.

⁷⁶⁹ Este valor con decimales corresponde al caso BAU, ajustado para cumplir con el requerimiento del std 90.1-2004 con la solución constructiva implementada.

Figura 357. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en cubierta sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared óptima, suelo BAU. Málaga (A3). Cubierta fría. El valor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 8,46 cm, mientras el contexto BAU implementa 8,46 cm, y el CTE exige 5,27 cm.

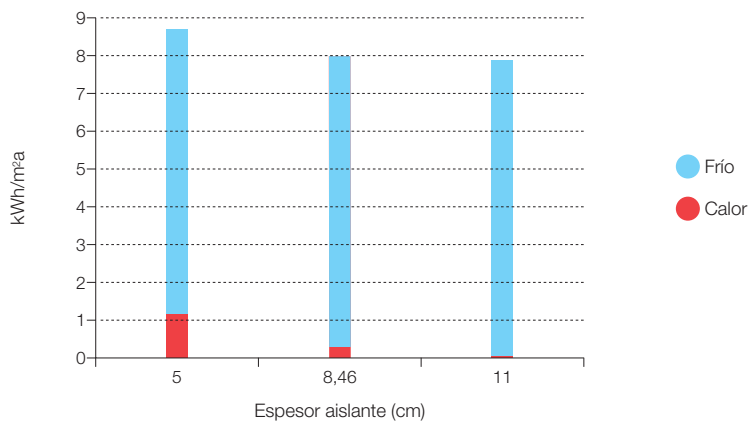
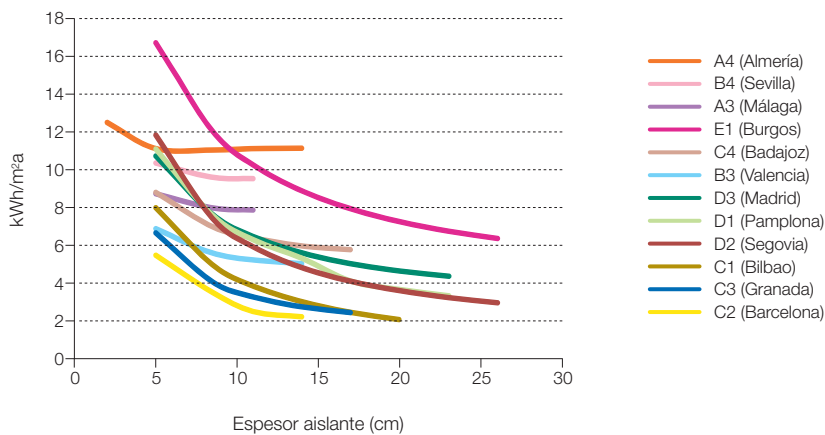


Figura 358. Comparativa entre los distintos niveles asintóticos de la demanda de servicios de climatización a la que nos conduce la aplicación de aislamiento ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en la cubierta (con valores óptimos de aislamiento en pared).



La figura 357 reproduce los resultados para Málaga (zona A3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 8,46 cm⁷⁷⁰.

En la figura 358 recogemos los resultados de los distintos estudios paramétricos para poder observar, de forma comparativa, entre

⁷⁷⁰ Este valor con decimales corresponde al caso BAU, ajustado para cumplir con el requerimiento del std 90.1-2004 con la solución constructiva implementada.

distintos emplazamientos climáticos su efecto sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Como podemos observar, los emplazamientos con elevada severidad climática de verano se quedan con una demanda residual superior a los de mayor severidad climática. Los valores finales de la demanda de servicios de climatización resultantes en la mayoría de emplazamientos son muy bajos, de tal forma que al aplicar tecnologías eficientes de generación van a conducir a una componente prácticamente despreciable en la estructura de energía final del contexto E3.0.

La figura 359 recoge los valores del aislamiento óptimo elegido para la cubierta en cada uno de los emplazamientos climáticos.

3.7.7.1.1.4 *Espesor aislamiento suelo*

En este punto recogemos los resultados del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante en el suelo.

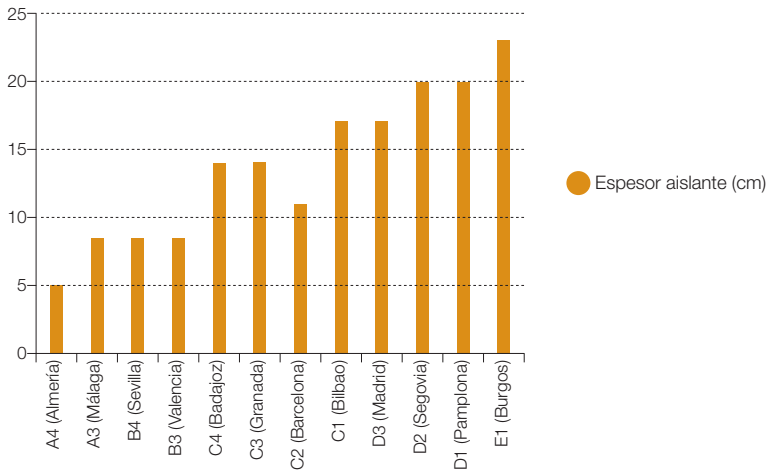
El edificio considerado incorpora todos los elementos del contexto E3.0 del apartado anterior y además para cada emplazamiento implementa el nivel óptimo de aislamiento de cubierta determinado en el apartado anterior.

Como punto de partida, la figura 360 nos recoge los requerimientos tanto de la regulación actual (CTE) como del estándar 90,1-2004 que hemos adoptado para describir el contexto BAU. Como podemos observar, especialmente en los emplazamientos de elevada severidad climática, el BAU representa una gran mejora en el nivel de aislamiento frente a la regulación actual.

Los estudios paramétricos de espesor de aislante en suelo se han desarrollado para los valores óptimos del espesor de aislante en paredes y cubierta determinados en los puntos anteriores.

La figura 361 reproduce los resultados para Madrid (zona D3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 16,9 cm⁷⁷¹.

Figura 359. Agrupación de los espesores óptimos de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de la cubierta adoptados para cada emplazamiento climático.



771 Este valor con decimales corresponde a que este es el espesor BAU, obtenido al imponer que la solución constructiva cumpla el requerimiento del std 90,1-2004.

Figura 360. Espesores de aislamiento (para aislante de conductividad 0,04 W/mK) requeridos por la regulación actual en España (CTE) y por la regulación que hemos adoptado como referencia para definir el escenario BAU (std 90.1-2004 de ASHRAE).

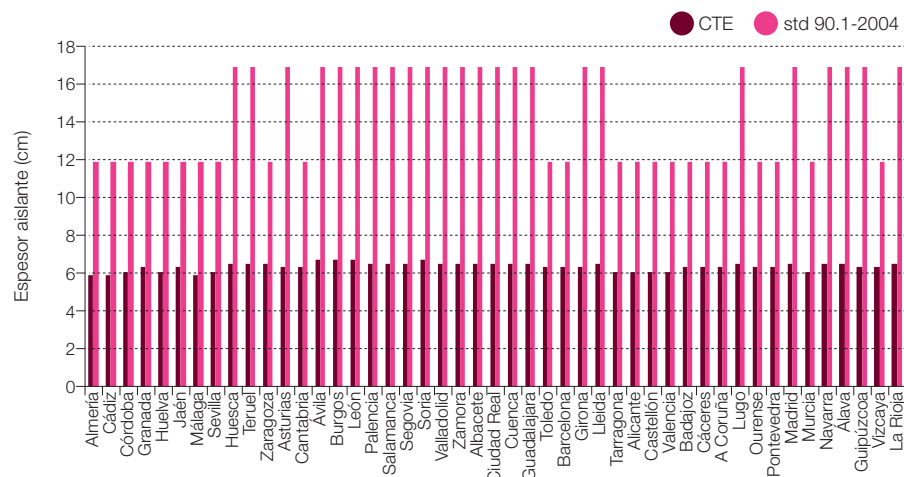


Figura 361. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Madrid (D3). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 16,9 cm, mientras que el BAU implementa 16,9 cm y el CTE exige 6,51 cm.

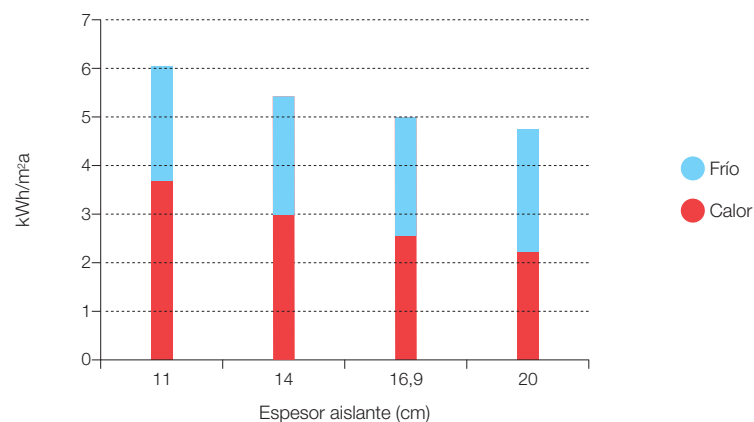


Figura 362. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Almería (A4). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 6 cm, mientras que el BAU implementa 11,91 cm y el CTE exige 5,90 cm.

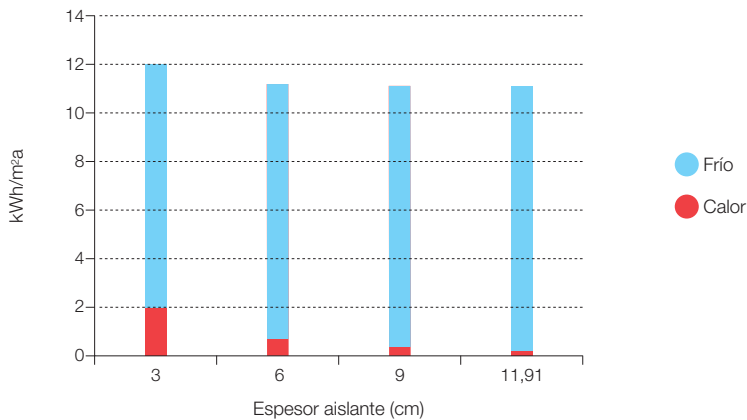
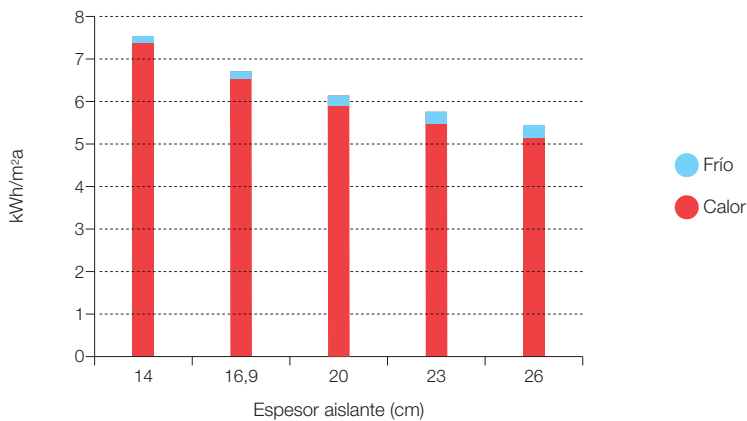


Figura 363. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Burgos (E1). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 23 cm, mientras que el BAU implementa 16,9 cm y el CTE exige 6,68 cm.



La figura 362 reproduce los resultados para Almería (zona A4 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 6 cm⁷⁷².

La figura 363 reproduce los resultados para Burgos (zona E1 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 23 cm.

⁷⁷² Nótese que este valor es significativamente inferior al BAU.

Figura 364. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Segovia (D2). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 20 cm, mientras que el BAU implementa 16,9 cm y el CTE exige 6,51 cm.

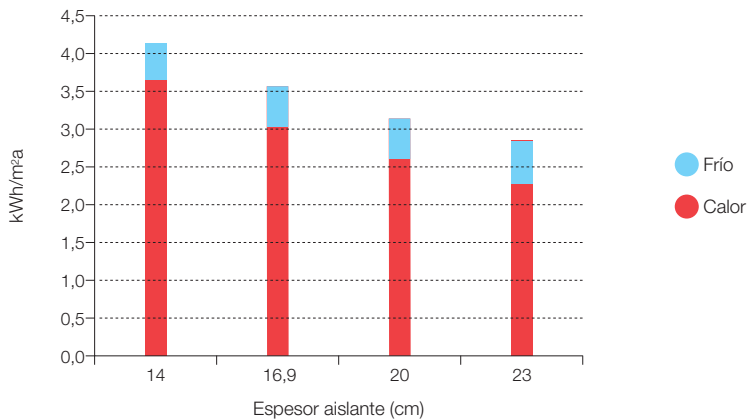
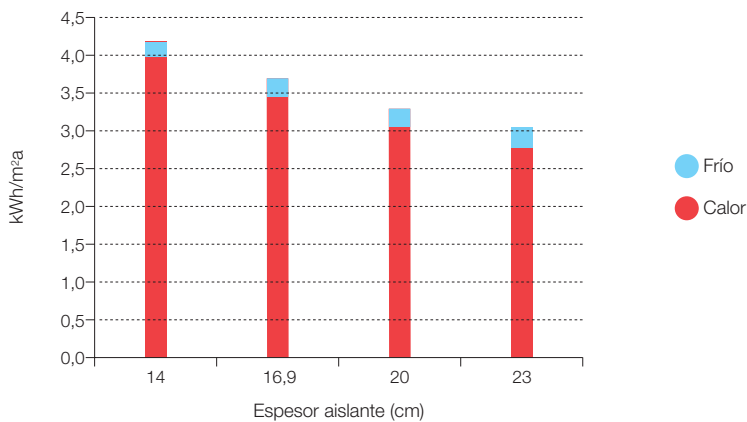


Figura 365. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Pamplona (D1). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 16,9 cm, mientras que el BAU implementa 16,9 cm y el CTE exige 6,51 cm.



La figura 364 reproduce los resultados para Segovia (zona D2 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 20 cm.

La figura 365 reproduce los resultados para Pamplona (zona D1 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 16,9 cm⁷⁷³.

⁷⁷³ Igual al BAU.

Figura 366. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Badajoz (C4). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 9 cm, mientras que el BAU implementa 11,91 cm y el CTE exige 6,35 cm.

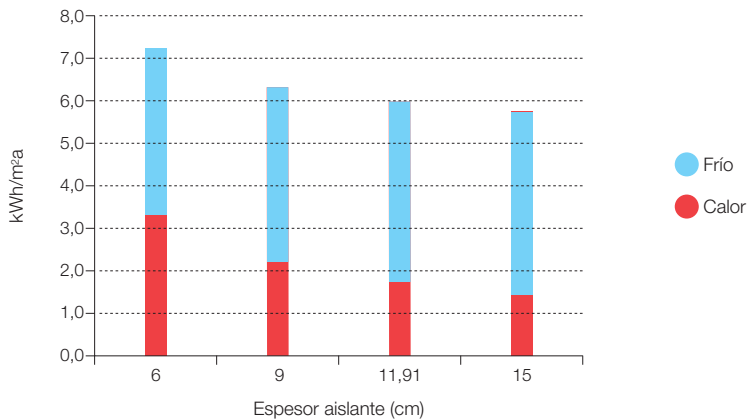
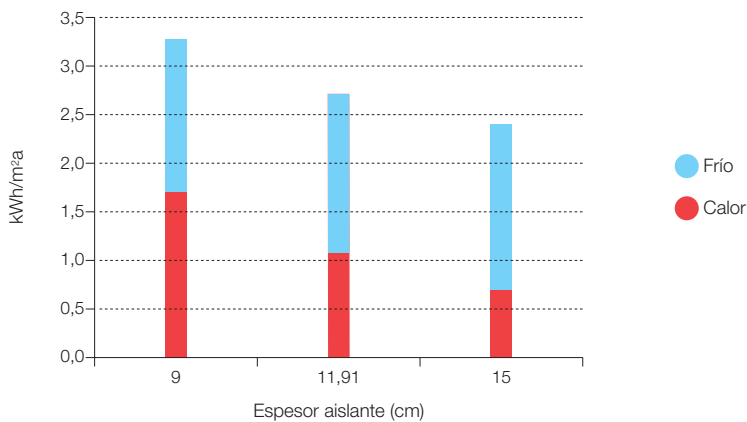


Figura 367. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Granada (C3). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 11,91 cm, mientras que el BAU implementa 11,91 cm y el CTE exige 6,35 cm.



La figura 366 reproduce los resultados para Badajoz (zona C4 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 9 cm⁷⁷⁴.

La figura 367 reproduce los resultados para Granada (zona C3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 11,91 cm⁷⁷⁵.

⁷⁷⁴ Inferior al BAU.
⁷⁷⁵ Igual al BAU.

Figura 368. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Barcelona (C2). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 11,91 cm, mientras que el BAU implementa 11,91 cm y el CTE exige 6,35 cm.

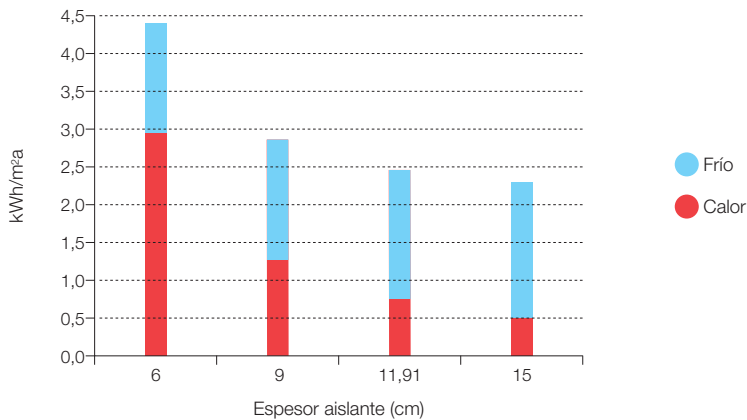
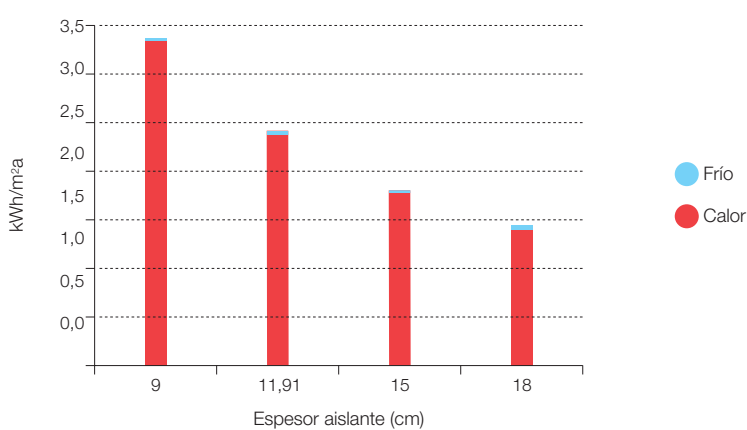


Figura 369. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Bilbao (C1). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 15 cm, mientras que el BAU implementa 11,91 cm y el CTE exige 6,35 cm.



La figura 368 reproduce los resultados para Barcelona (zona C2 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 11,91 cm⁷⁷⁶.

La figura 369 reproduce los resultados para Bilbao (zona C1 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 15 cm.

⁷⁷⁶ Igual al BAU.

Figura 370. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Sevilla (B4). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 9 cm, mientras que el BAU implementa 11,91 cm y el CTE exige 6,04 cm.

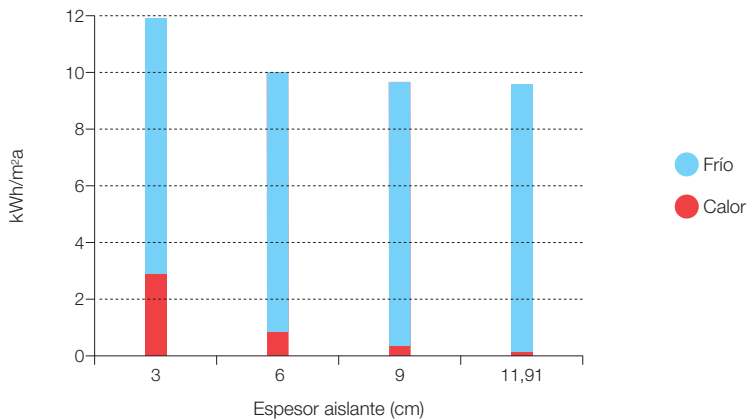
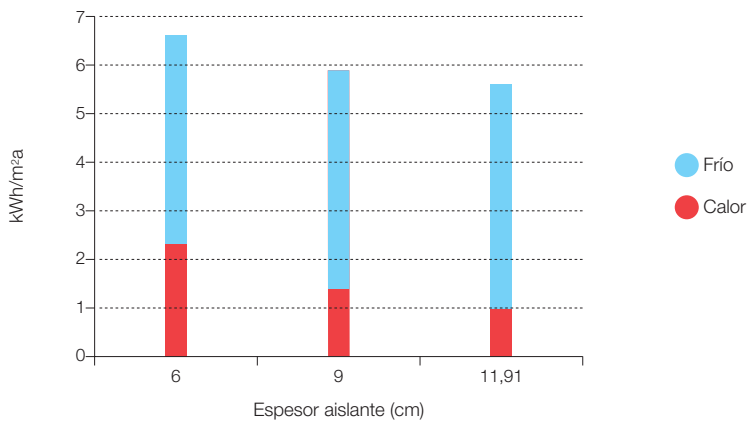


Figura 371. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Valencia (B3). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 9 cm, mientras que el BAU implementa 11,91 cm y el CTE exige 6,04 cm.



La figura 370 reproduce los resultados para Sevilla (zona B4 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 9 cm⁷⁷⁷.

La figura 371 reproduce los resultados para Valencia (zona B3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 9 cm⁷⁷⁸.

⁷⁷⁷ Inferior al BAU.
⁷⁷⁸ Inferior al BAU.

Figura 372. Resultado del estudio paramétrico del efecto del espesor de aislante ($k = 0,04$ W/mK) en suelo sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Pared y cubierta óptimas. Málaga (A3). El espesor de aislante elegido para el contexto E3.0 es de 6 cm, mientras que el BAU implementa 11,91 cm y el CTE exige 5,90 cm.

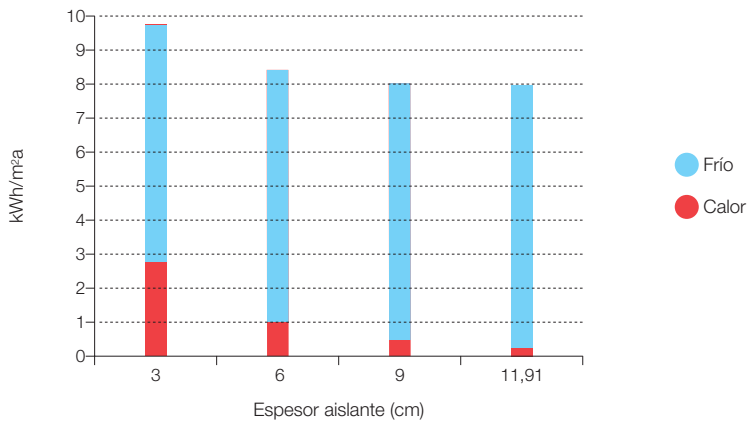
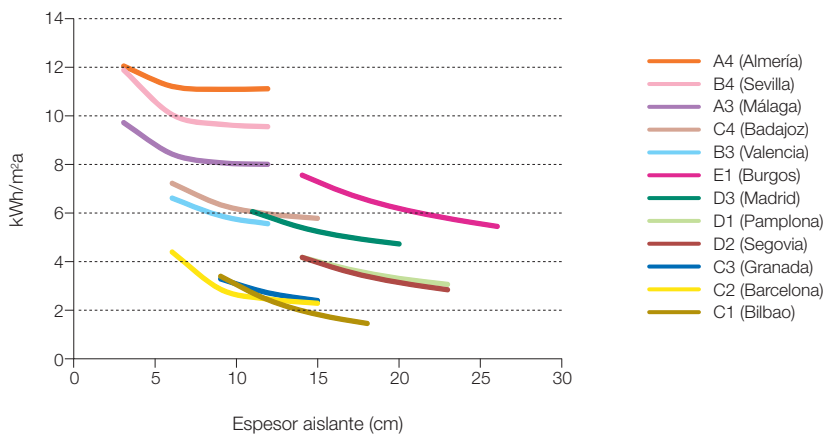


Figura 373. Comparativa entre los distintos niveles asintóticos de la demanda de servicios de climatización a la que nos conduce la aplicación de aislamiento ($k = 0,04$ W/mK) en el suelo (con valores óptimos de aislamiento en pared y cubierta).

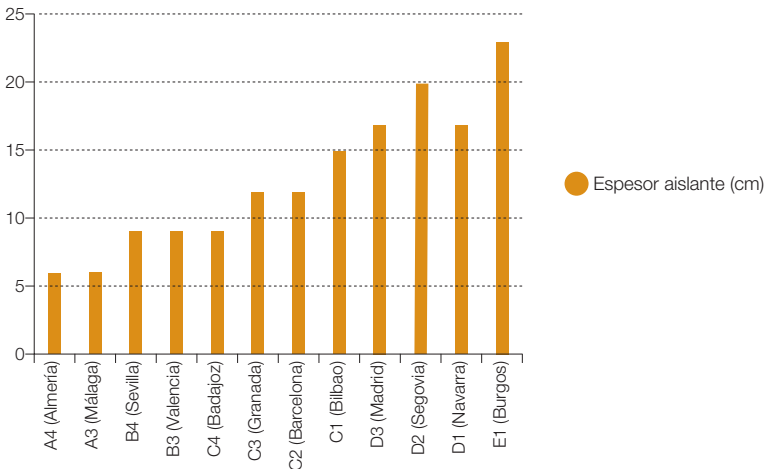


La figura 372- reproduce los resultados para Málaga (zona A3 del CTE). El espesor óptimo elegido es de 6 cm⁷⁷⁹.

En la figura 373 recogemos los resultados de los distintos estudios paramétricos para poder observar de forma comparativa entre distintos

⁷⁷⁹ Inferior al BAU.

Figura 374. Agrupación de los espesores óptimos de aislante ($k = 0,04 \text{ W/mK}$) de el suelo adoptados para cada emplazamiento climático.



emplazamientos climáticos su efecto sobre la demanda de servicios energéticos de climatización. Como podemos observar, los emplazamientos con elevada severidad climática de verano se quedan con una demanda residual superior a los de mayor severidad climática de invierno. Los valores finales de la demanda de servicios de climatización resultantes en la mayoría de emplazamientos son muy bajos, de tal forma que al aplicar tecnologías eficientes de generación van a conducir a una componente prácticamente despreciable en la estructura de energía final del contexto E3.0.

La figura 374 recoge los valores del aislamiento óptimo elegido para el suelo en cada uno de los emplazamientos climáticos.

3.7.7.1.1.5 Caracterización final BAU & E3.0 de la tipología unifamiliar

Uno de los elementos que conviene resaltar respecto a la evolución del contexto BAU al E3.0, es que además de una gran reducción del consumo de energía, éste experimenta una gran regularización a lo largo del año. En efecto, las figuras 375 a 378 nos muestran la evolución diaria del consumo⁷⁸⁰ de energía final⁷⁸¹ para los emplazamientos climáticos de Almería y Burgos⁷⁸². El origen de esta gran regularización es que el consumo energético, asociado a la cobertura de la demanda de energía térmica para climatización, se reduce tanto en el contexto E3.0 que los equipamientos pasan a dominar la estructura de la demanda, perdiéndose en gran medida la dependencia climática de la distribución estacional del consumo de energía asociado a los edificios.

⁷⁸⁰ Nótese que así como en los apartados anteriores presentábamos los valores de las demandas de servicios (fundamentalmente de climatización), aquí pasamos ya a reflejar los valores de los consumo de energía final, incorporando el efecto de los equipamientos empleados para cubrir las demandas de servicios de acuerdo con este consumo de energía final.

⁷⁸¹ En este caso sin considerar la aportación de solar térmica para ACS. Además, los COP de calor y frío en el contexto E3.0 son para este ejemplo ligeramente superiores a los finalmente adoptados. Más adelante presentaremos los resultados anuales para los COP finalmente adoptados para representar el contexto E3.0.

⁷⁸² Nótese que en el contexto E3.0 la electrificación es del 100%.

Figura 375. Evolución diaria del consumo de energía final para Almería en el contexto BAU.

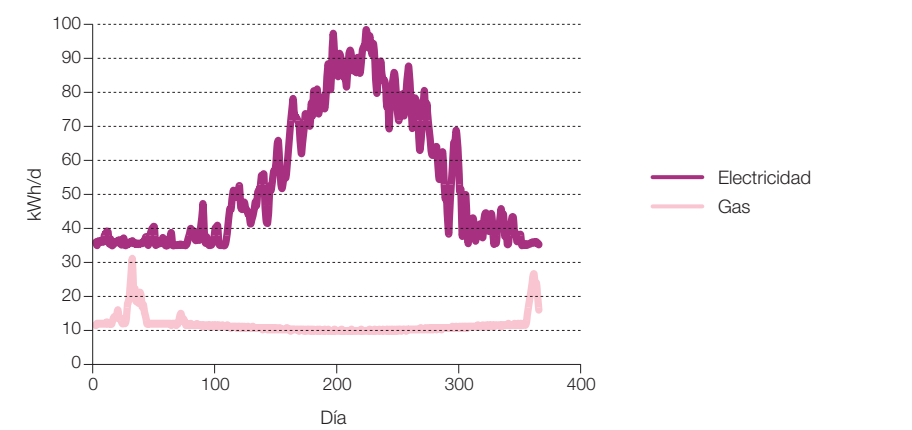


Figura 376. Evolución diaria del consumo de energía final para Almería en el contexto E3.0.

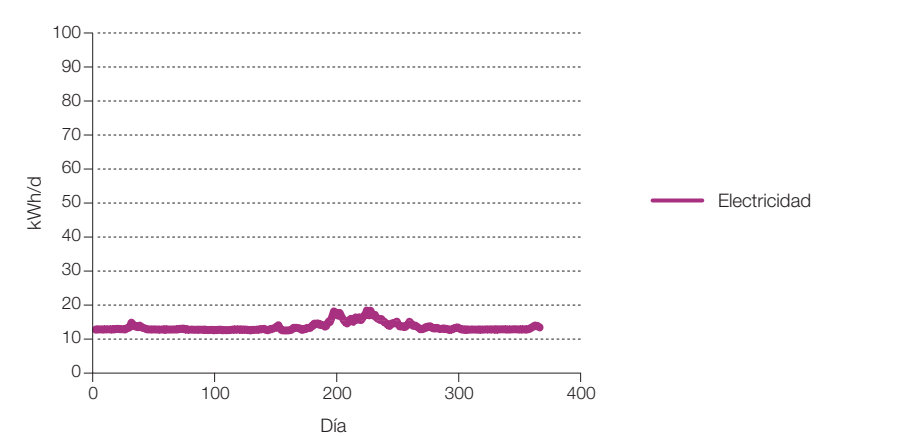


Figura 377. Evolución diaria del consumo de energía final para Burgos en el contexto BAU.

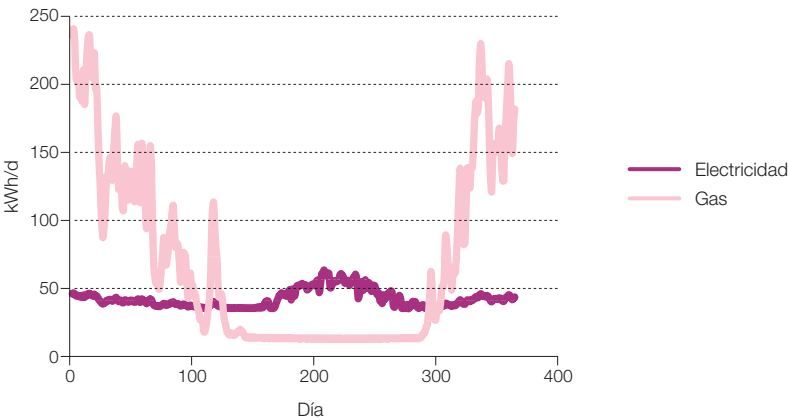
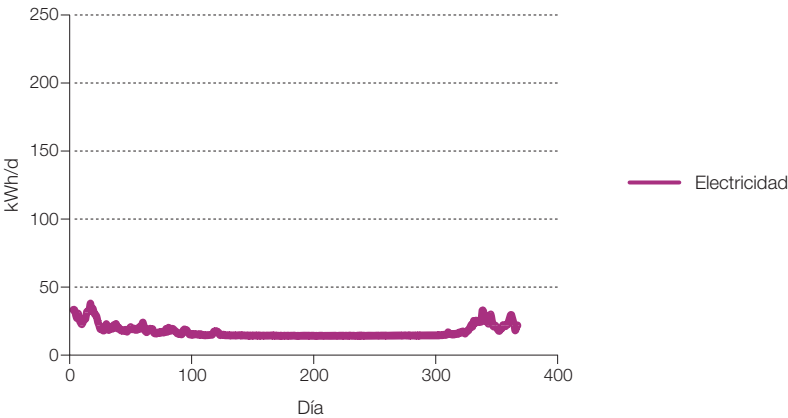


Figura 378. Evolución diaria del consumo de energía final para Burgos en el contexto E3.0.



En las figuras 379 a 382 recogemos la estructura del consumo de energía final⁷⁸³ en los dos emplazamientos climáticos extremos de Almería y Burgos⁷⁸⁴. Como pode-

mos observar, al evolucionar hacia el contexto E3.0 los equipamientos pasan a constituir la componente principal del consumo energético.

Figura 379. Estructura de la demanda de energía final para la vivienda unifamiliar en Almería y el contexto BAU.

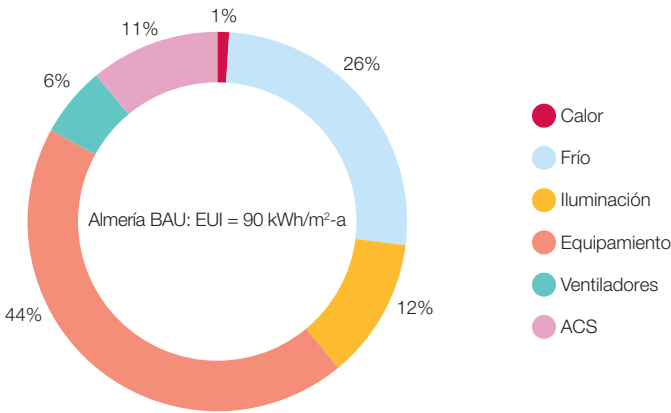
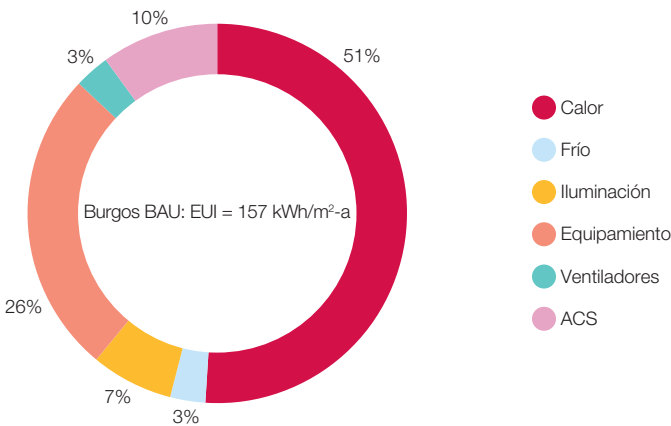


Figura 380. Estructura de la demanda de energía final para la vivienda unifamiliar en Burgos y el contexto BAU.



783 La EUI (Energy Use Intensity) que aparece en estos gráficos es el consumo total de energía final en términos específicos, descontando el aporte autónomo de la solar térmica para la cobertura parcial del ACS.

784 Incorporando ya en este caso tanto los valores finales de los rendimientos de caldera y COP de enfriadoras y bombas de calor (rendimientos de los equipos empleados para cubrir la demanda de servicios). Así mismo estos resultados ya descuentan el aporte de energía solar térmica autónoma para la cobertura del ACS.

Figura 381. Estructura de la demanda de energía final para la vivienda unifamiliar en Almería y el contexto E3.0.

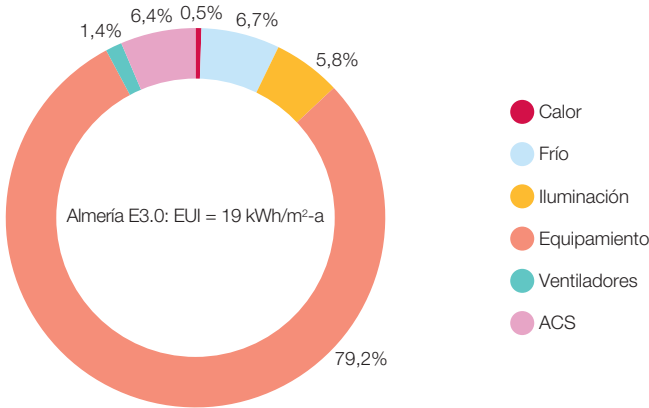
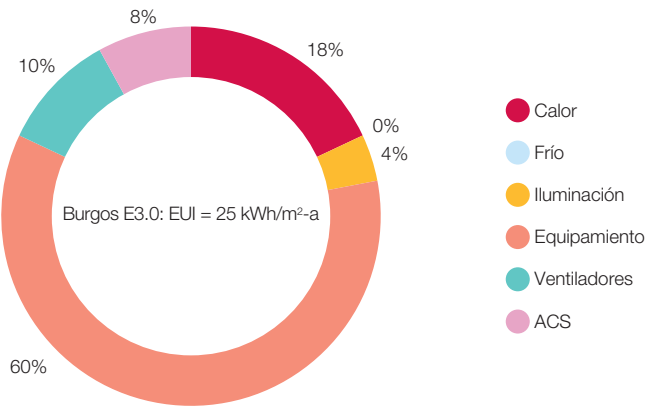


Figura 382. Estructura de la demanda de energía final para la vivienda unifamiliar en Burgos y el contexto E3.0.



En la figura 383 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. Como podemos observar, ya en el contexto BAU la componente regulada representa tan solo del orden del 40%-65% de consumo final, y al

pasar al contexto E3.0 este porcentaje se reduce hasta valores del orden del 15%-30%, quedando fuera del alcance de la regulación la mayoría del consumo energético del edificio. Por este motivo resulta recomendable que se emplee como indicador del desempeño energético del edificio su consumo total

de energía final, y que la regulación incorpore todas las componentes del consumo si su finalidad es contribuir a dirigir el sector edificación hacia mayores niveles de eficiencia.

En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto a total, la figura 384 nos muestra cómo se llega a reducir esta componente de la demanda en el contexto E3.0.

Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 385 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 80% -85%, incrementándose al considerar los ahorros en términos de energía regulada o de climatización, llegando en este último caso a obtener niveles de ahorro en las demandas de energía regulada y de climatización del orden del 95%.

Figura 383. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Vivienda unifamiliar.

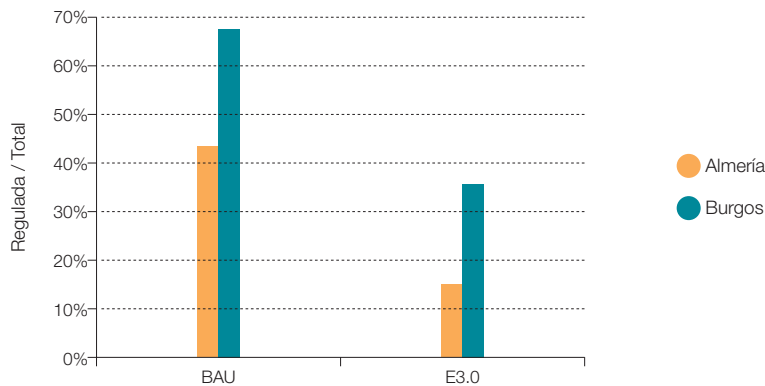


Figura 384. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Vivienda unifamiliar.

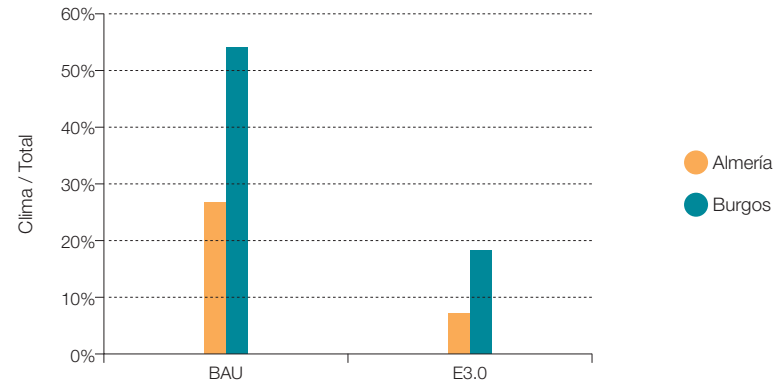


Figura 385. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Vivienda unifamiliar.

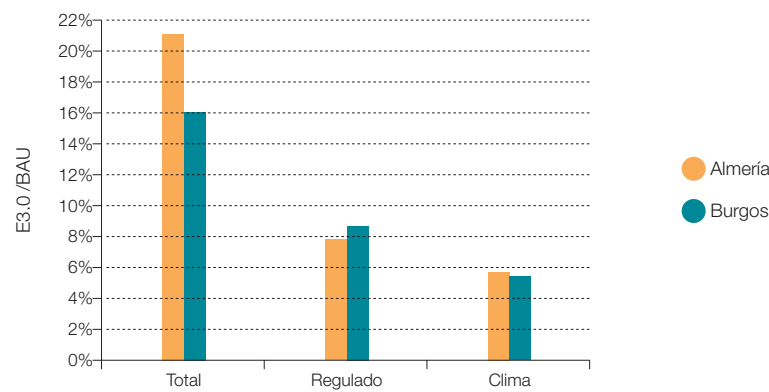
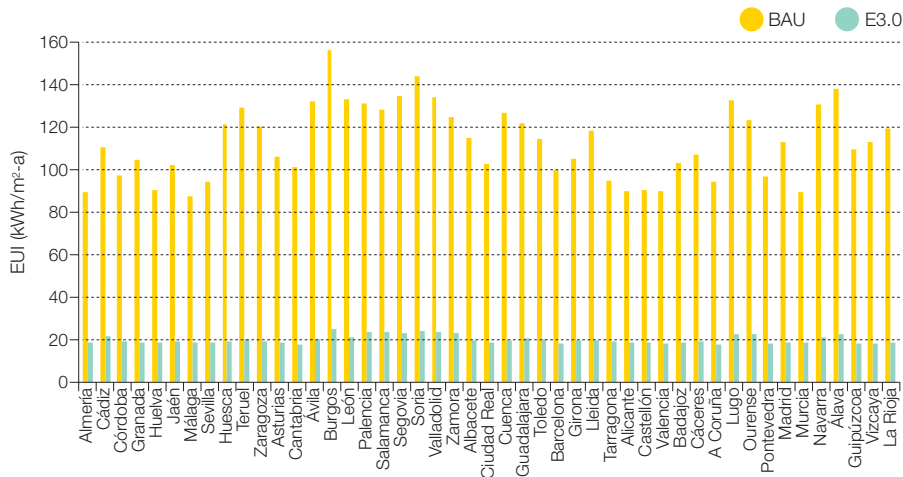


Figura 386. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Vivienda unifamiliar.



Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 386 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, obteniendo

para el contexto E3.0 una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.2 Residencial bloque

En este apartado vamos a recopilar la caracterización del desempeño energético del modo de edificio residencial en bloque. Tal y como indicamos anteriormente, por limitación en el alcance de este trabajo, no vamos a repetir los estudios paramétricos desarrollados en el caso del edificio residencial unifamiliar,

para caracterizar los niveles óptimos de aislamiento de la envolvente del edificio, empleando para todos⁷⁸⁵ los modos de edificio en el contexto E3.0 los valores de aislamiento seleccionados en los estudios paramétricos del edificio residencial unifamiliar.

En las figuras 387 y 388 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁷⁸⁶ en

Figura 387. Estructura de la demanda de energía final para el bloque de viviendas en Almería y el contexto BAU.

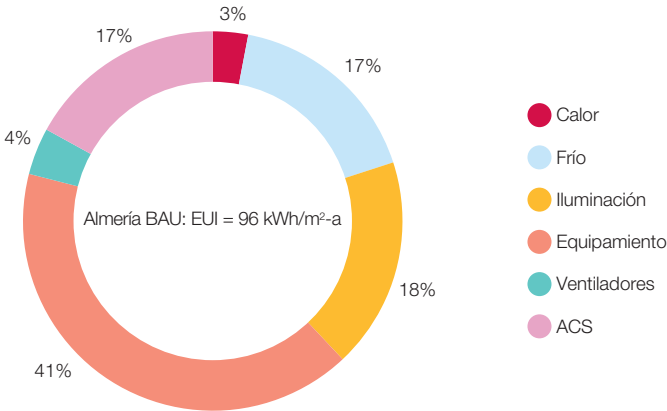
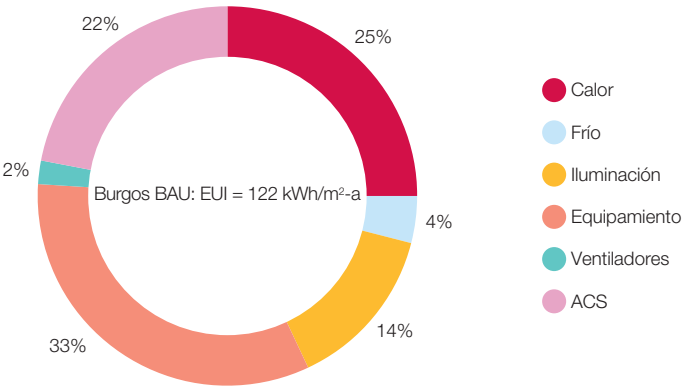


Figura 388. Estructura de la demanda de energía final para el bloque de viviendas en Burgos y el contexto BAU.



785 Es evidente que las distintas tipologías y condiciones de uso de los distintos modos de edificios conducirían a valores inferiores del valor óptimo de espesor de aislante, por lo que es totalmente recomendable acometer este análisis edificio a edificio en el marco del proyecto de cada edificio. Sin embargo, para los fines perseguidos en este informe, esto es la caracterización del potencial de ahorro en el sector edificación, consideramos suficiente la aproximación adoptada. En efecto, el edificio unifamiliar es de los edificios de menor tamaño y compacidad considerados, así como de los que menores cargas internas tiene tanto por horario de operación como por nivel de equipamientos. En estas condiciones cabe esperar que los valores más elevados del nivel óptimo de aislamiento surjan en esta tipología de edificio, y tal y como vimos en el punto dedicado al análisis de la economía del ahorro, una vez superado el valor óptimo del aislamiento las prestaciones del edificio y sus costes totales presentaban una dependencia funcional de pendiente casi nula con el espesor de aislamiento.

786 Descontando la aportación solar térmica autónoma.

los emplazamientos climáticos extremos de Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 389 y 390 nos muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

El primer aspecto que salta a la vista al pasar al contexto E3.0 es la estructura tipo “jarro de

flores” que adopta la demanda energética, con un gran predominio de la demanda energética de los equipamientos sobre el resto de los componentes de demanda. También merece la pena de resaltarse la inversión del orden en cuanto a demanda energética total, pasando⁷⁸⁷ el emplazamiento de mayor demanda en contexto BAU (el de mayor severidad climática de invierno) a ser el de menor

Figura 389. Estructura de la demanda de energía final para el bloque de viviendas en Almería y el contexto E3.0.

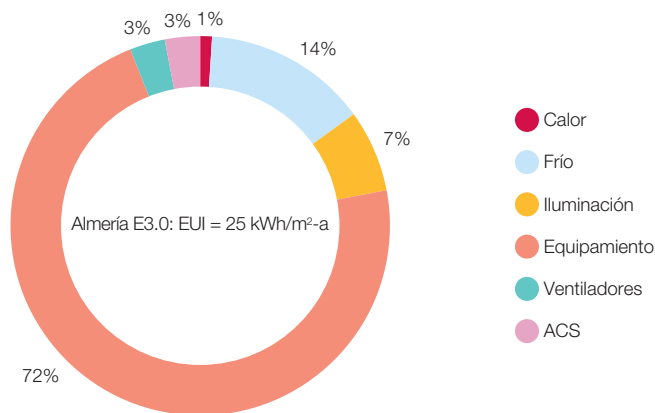
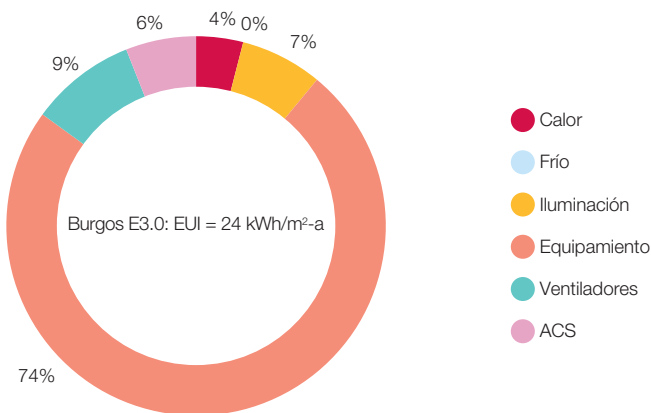


Figura 390. Estructura de la demanda de energía final para el bloque de viviendas en Burgos y el contexto E3.0.



⁷⁸⁷ Consecuencia de una mayor efectividad de las medidas pasivas destinadas a reducir la demanda de calefacción que las asociadas a la reducción de la demanda de refrigeración.

demanda en contexto E3.0, aunque la diferencia en contexto E3.0 entre ambos emplazamientos es realmente pequeña.

En la figura 391 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total, y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. Como podemos observar, si incluso en el contexto

BAU la parte regulada constituye tan solo del orden de la mitad del consumo de energía total, en el contexto E3.0 apenas llega a un 20%. Este resultado nos indica la necesidad de centrarnos en el consumo de energía total a la hora de analizar los requerimientos de reducción, y como consecuencia, la conveniencia de regular el total del consumo energético en lugar de tan solo una pequeña fracción si

Figura 391. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Bloque de viviendas.

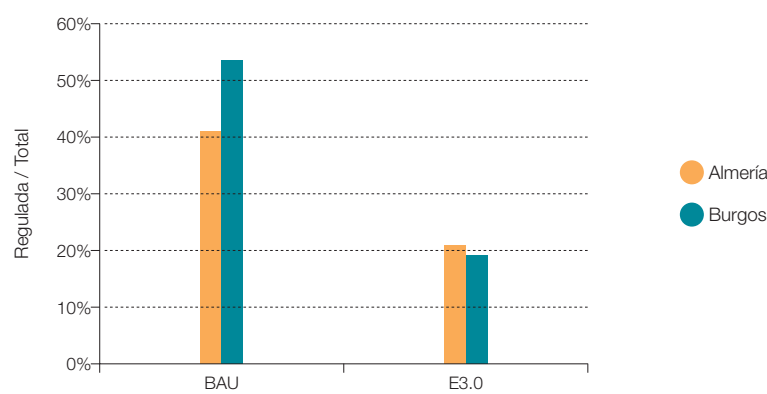
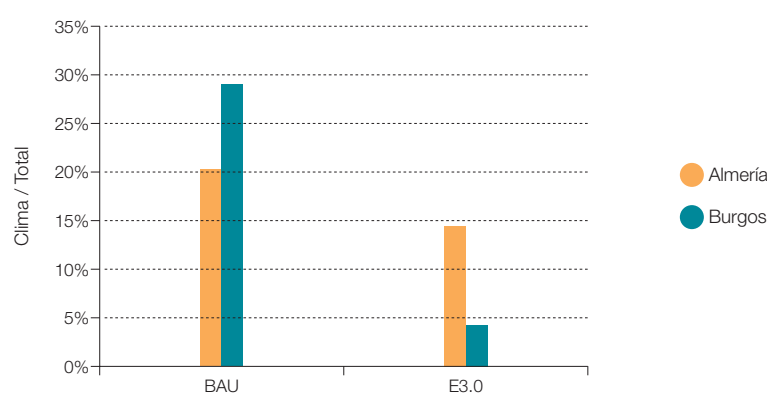


Figura 392. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Bloque de viviendas.



queremos que esa regulación sirva para re-
conducir el sector de la edificación hacia ma-
yores niveles de eficiencia.

En el caso de analizar el ratio entre energía
para climatizar respecto a la total, la figura
392 nos muestra cómo se llega a reducir

esta componente de la demanda en el con-
texto E3.0, especialmente en los emplaza-
mientos de elevada severidad climática de in-
vierno. En efecto, en estos emplazamientos el
consumo de energía para climatizar pasa de
ser la componente dominante de la demanda
en el contexto BAU a ser una componente

Figura 393. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del
contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Bloque de viviendas.

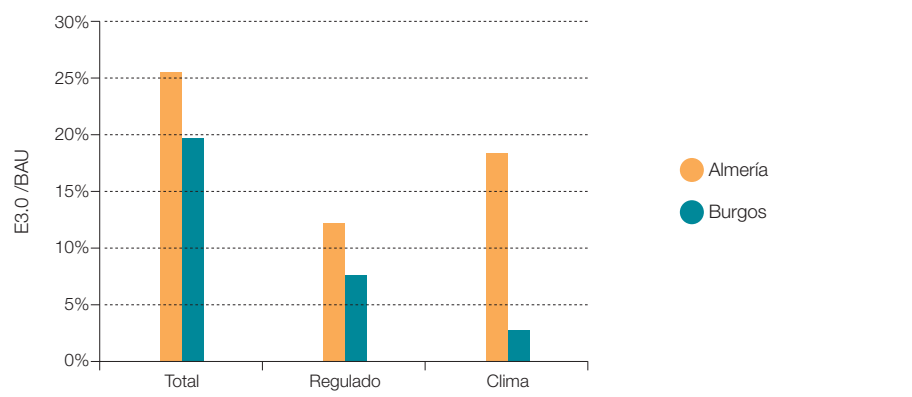
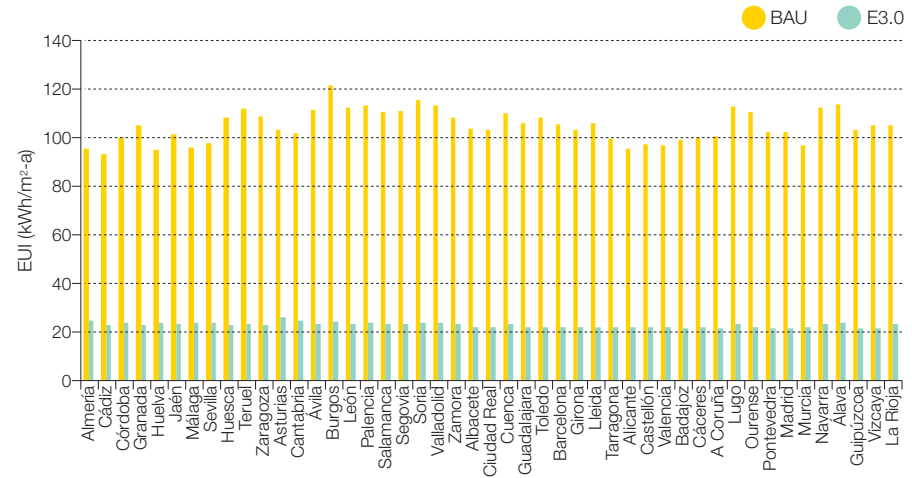


Figura 394. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos
BAU y E3.0. Bloque de viviendas.



prácticamente irrelevante. A ello contribuyen por un lado la gran reducción de la demanda del edificio, y por otro lado a la gran eficiencia de las bombas de calor para cubrir esa demanda residual.

Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 393 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 80%, y se incrementan al considerar los ahorros en términos de energía regulada o de climatización, y llegan, para el caso de emplazamientos de elevada severidad climática de invierno⁷⁸⁸, a obtener niveles de ahorro en las demandas de energía regulada y de climatización del orden del 95%.

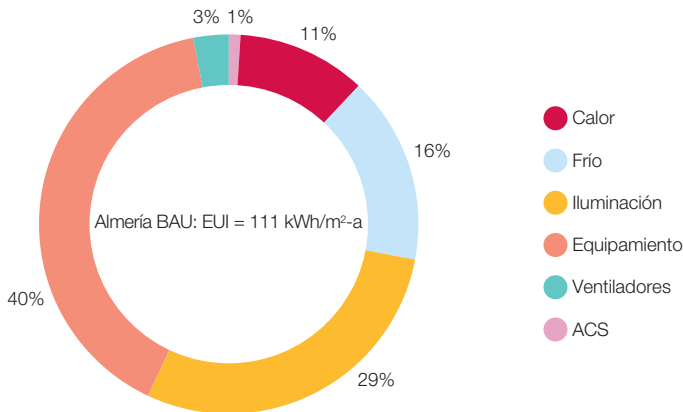
Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía

final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 394 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, y se obtiene para el contexto E3.0 una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.3 Oficina

En las figuras 395 y 396 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁷⁸⁹ en los emplazamientos climáticos extremos de Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 397 y 398 nos muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

Figura 395. Estructura de la demanda de energía final para la oficina en Almería y el contexto BAU.



⁷⁸⁸ Que son aquellos que en la actualidad consumen más energía y para los cuales la regulación actual permite unos mayores niveles de consumo.
⁷⁸⁹ Descontando la aportación solar térmica local.

Figura 396. Estructura de la demanda de energía final para la oficina en Burgos y el contexto BAU.

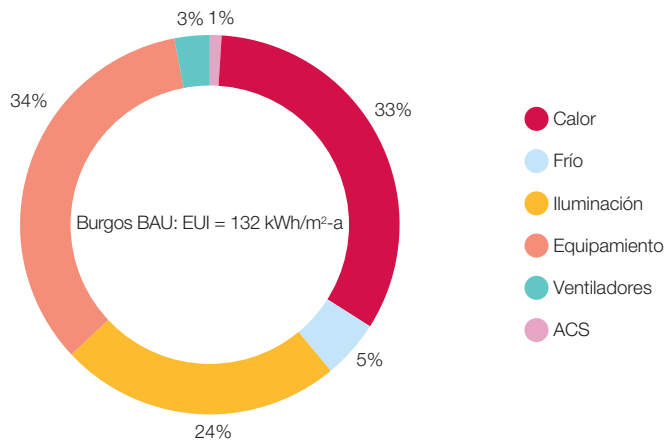


Figura 397. Estructura de la demanda de energía final para la oficina en Almería y el contexto E3.0.

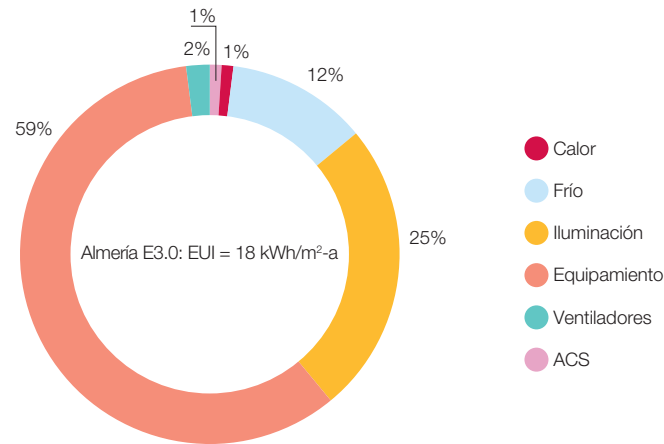
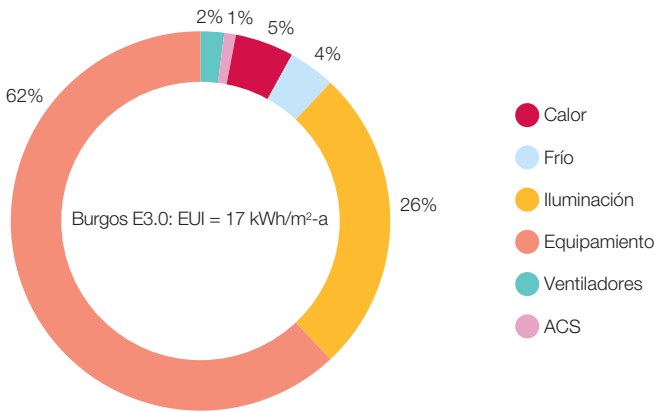


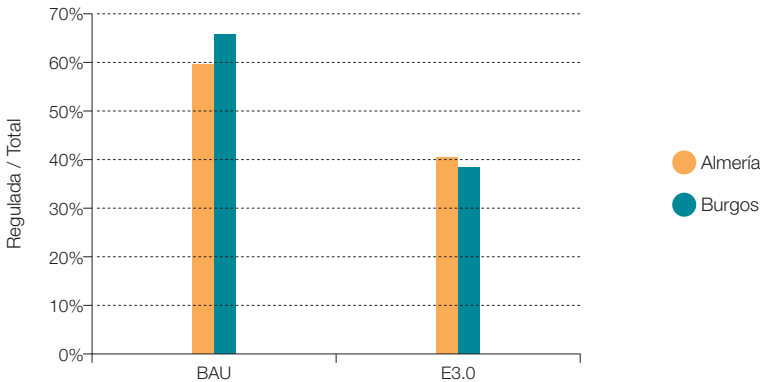
Figura 398. Estructura de la demanda de energía final para la oficina en Burgos y el contexto E3.0.



En la figura 399 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. En el caso de los edificios terciarios, la parte regulada incluye la energía para iluminación. En este caso, la parte regulada representa un mayor porcentaje del consumo total que para los edificios residenciales, pero en el contexto E3.0 no llega

a un 40%. Este resultado nos indica la necesidad de centrarnos en el consumo de energía total a la hora de analizar los requerimientos de reducción, y como consecuencia, la conveniencia de regular el total del consumo energético en lugar de tan solo una pequeña fracción, si queremos que esa regulación sirva para reconducir el sector de la edificación hacia mayores niveles de eficiencia.

Figura 399. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Oficina.



En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto a total, la figura 400 nos muestra cómo se llega a reducir este componente de la demanda en el contexto E3.0, especialmente en los emplazamientos de elevada severidad climática de invierno. En efecto, en estos emplazamientos el consumo de energía para climatizar pasa de ser el componente dominante de la demanda en el contexto BAU a ser un componente de los menos importantes.

A ello contribuyen, por un lado, la gran reducción de la demanda del edificio, y por otro lado a la gran eficiencia de las bombas de calor para cubrir esa demanda residual.

Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 401 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 86%, que se

Figura 400. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Oficina.

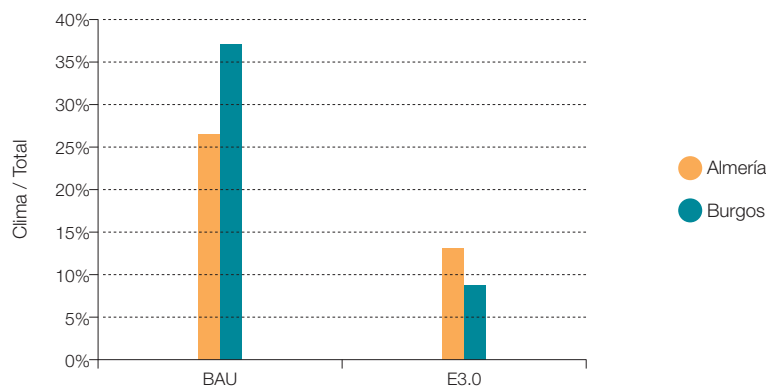
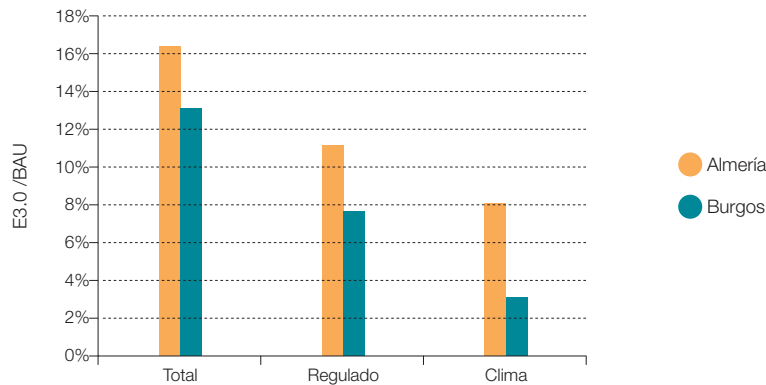


Figura 401. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Oficina.



incrementan al considerar los ahorros en términos de energía regulada o de climatización, y llegan, para el caso de emplazamientos de elevada severidad climática de invierno⁷⁹⁰, a obtener niveles de ahorro en las demandas de energía regulada y de climatización del orden del 98%.

Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 402 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, y obtienen

Figura 402. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Oficina.

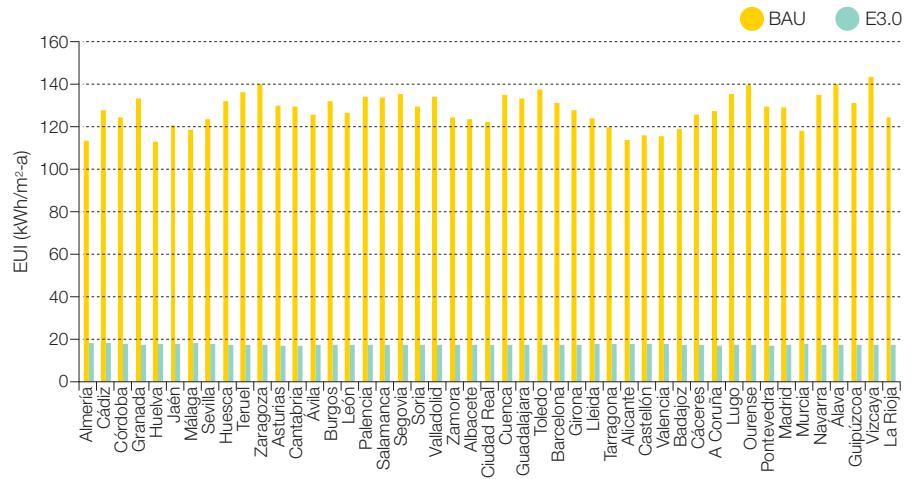
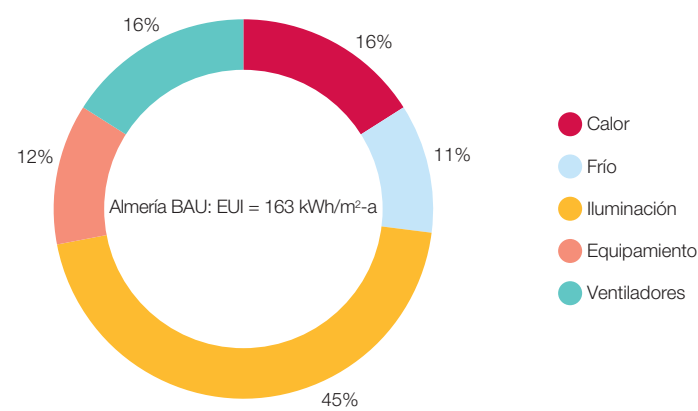


Figura 403. Estructura de la demanda de energía final para el comercio en Almería en contexto BAU.



790 Que son aquellos que en la actualidad consumen más energía y para los cuales la regulación actual permite unos mayores niveles de consumo.

para el contexto E3.0 una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.4 Comercio

En las figuras 403 y 404 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁷⁹¹ en los emplazamientos climáticos extremos de

Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 405 y 406 nos muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

En la figura 407 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. En el

Figura 404. Estructura de la demanda de energía final para el comercio en Burgos en contexto BAU.

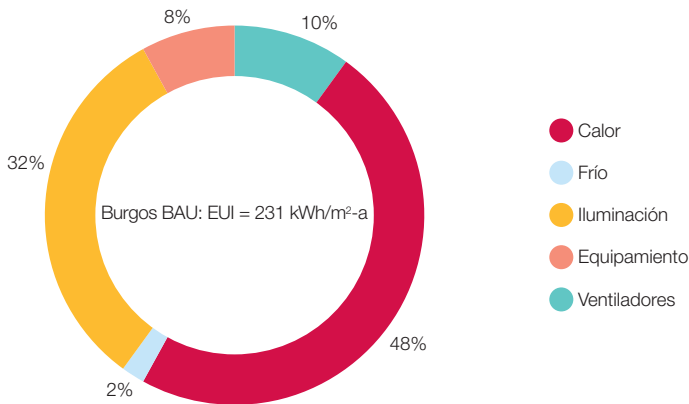
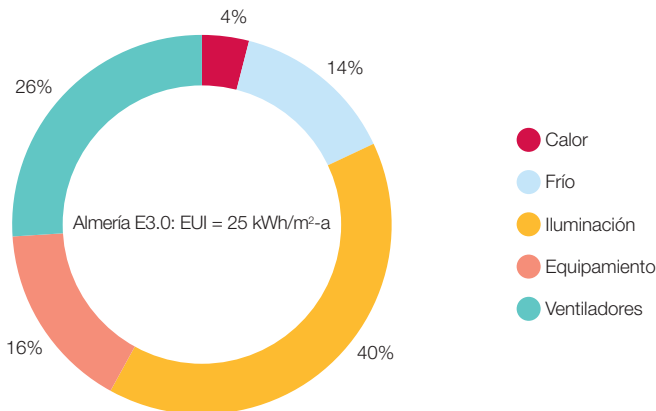


Figura 405. Estructura de la demanda de energía final para el comercio en Almería en contexto E3.0.



⁷⁹¹ Descontando la aportación solar térmica local.

Figura 406. Estructura de la demanda de energía final para el comercio en Burgos en contexto E3.0.

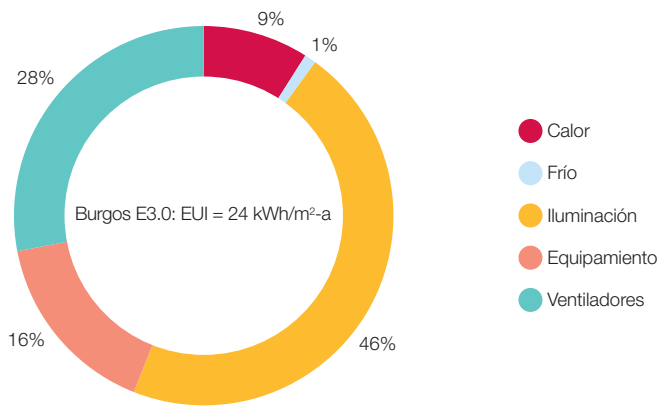
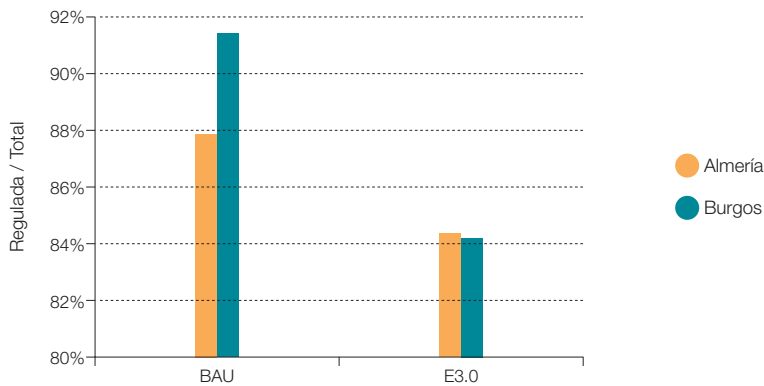


Figura 407. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Comercio.

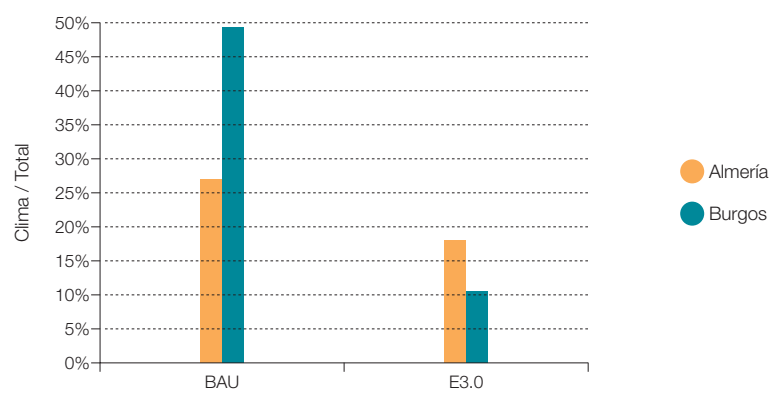


caso de los edificios terciarios, la parte regulada incluye la energía para iluminación. En este caso, la parte regulada representa la mayoría del consumo total debido al gran peso de la iluminación, sin embargo, en el contexto E3.0 se queda en el orden del 84%, lo cual sigue haciendo recomendable tomar como objetivo la energía total.

En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto a total, la figura 408 nos muestra cómo se llega a reducir esta

componente de la demanda en el contexto E3.0, especialmente en los emplazamientos de elevada severidad climática de invierno. En efecto, en estos emplazamientos el consumo de energía para climatizar pasa de ser la componente dominante de la demanda en el contexto BAU a ser la componente menos importante. A ello contribuyen por un lado la gran reducción de la demanda del edificio, y por otro lado a la gran eficiencia de las bombas de calor para cubrir esa demanda residual.

Figura 408. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Comercio.

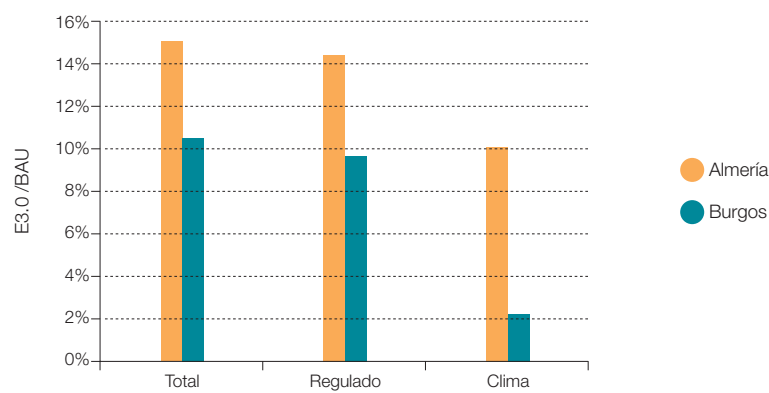


Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 409 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 88%, que se incrementan al considerar los ahorros en términos de energía regulada o de climatización, y llegan, para el caso de emplazamientos de elevada severidad climática de

invierno⁷⁹², a obtener niveles de ahorro en las demandas de energía regulada y de climatización del orden del 98%.

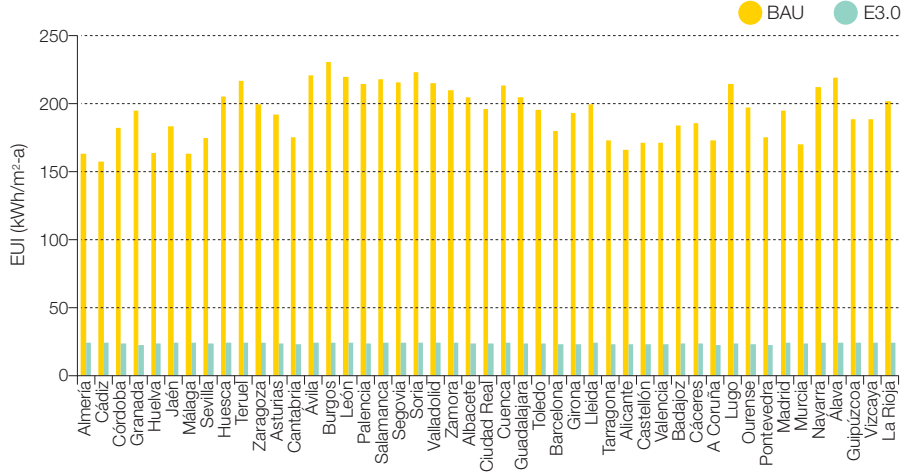
Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 410 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar,

Figura 409. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Comercio.



⁷⁹² Que son aquellos que en la actualidad consumen más energía y para los cuales la regulación actual permite unos mayores niveles de consumo.

Figura 410. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Comercio.

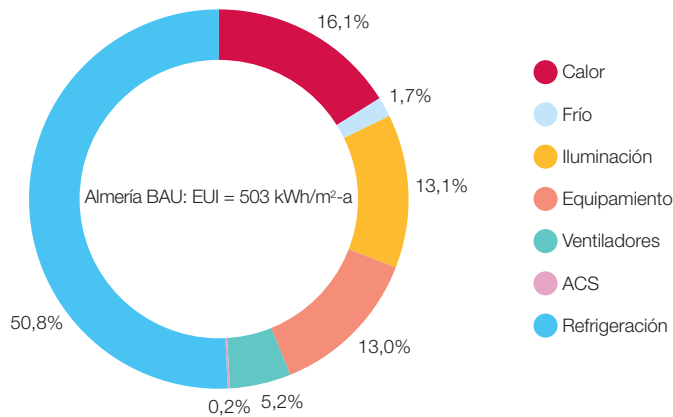


en todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, que obtiene para el contexto E3.0 una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.5 Supermercado

El supermercado lo hemos diferenciado del resto de comercios, por la existencia de consumos asociados a la refrigeración de

Figura 411. Estructura de la demanda de energía final para el supermercado en Almería en contexto BAU.



alimentos⁷⁹³, que a su vez repercuten sobre el consumo de climatización del edificio.

En las figuras 411 y 412 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁷⁹⁴ en los emplazamientos climáticos extremos de Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 413 y 414 nos

muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

Podemos observar el importante efecto de la refrigeración de alimentos sobre la estructura de la demanda energética, tanto por su efecto directo sobre el consumo eléctrico, como por

Figura 412. Estructura de la demanda de energía final para el supermercado en Burgos en contexto BAU.

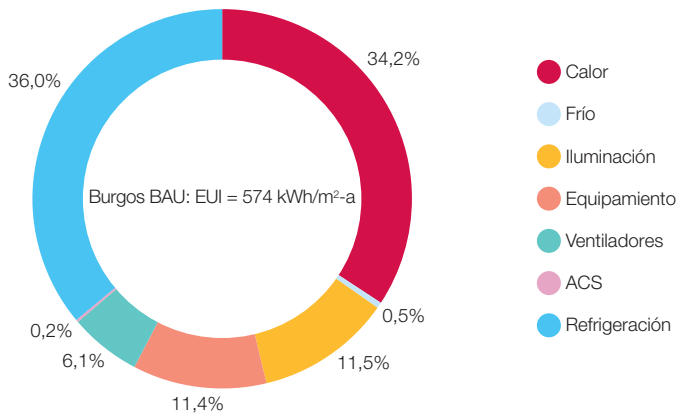
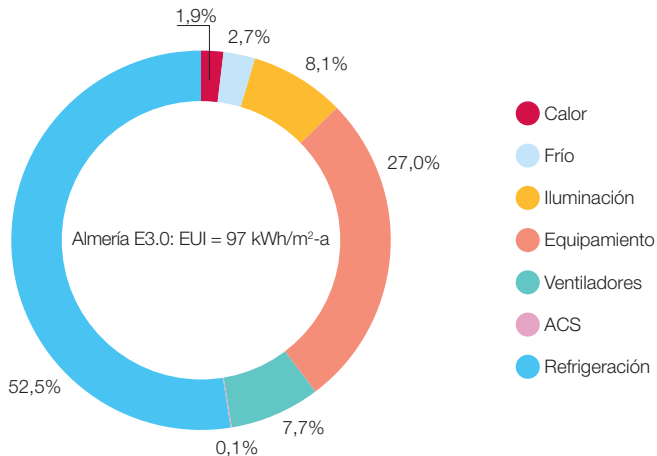


Figura 413. Estructura de la demanda de energía final para el supermercado en Almería en contexto E3.0.



⁷⁹³ Este tipo de elementos de consumo presentan un gran potencial para aplicaciones de gestión y respuesta de la demanda al integrar el sector edificación en el sistema energético.

⁷⁹⁴ Descontando la aportación solar térmica local.

su efecto indirecto sobre la demanda de calefacción. En el contexto E3.0 se consigue acotar mucho la demanda de calefacción, lo cual, junto a las mejoras en iluminación, conduce a que la refrigeración y los equipamientos dominan la estructura de la demanda energética.

En la figura 415 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución

al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. En el caso de los edificios terciarios, la parte regulada incluye la energía para iluminación. En este caso, las cargas de proceso (refrigeración de alimentos y otro equipamiento) dominan la estructura de la demanda energética, de tal forma que incluso en el contexto BAU la parte regulada de la demanda es tan solo del orden

Figura 414. Estructura de la demanda de energía final para el supermercado en Burgos en contexto E3.0.

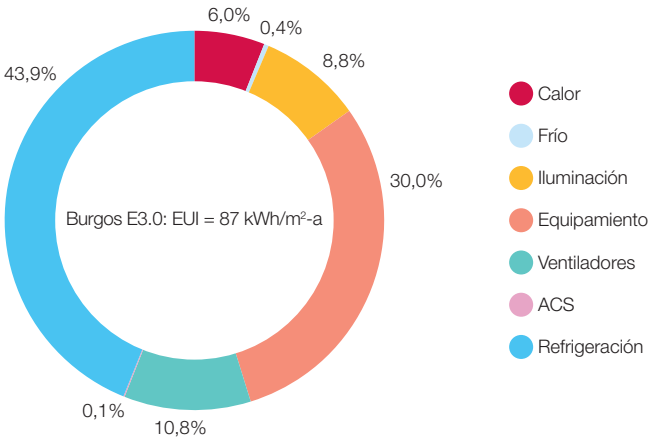
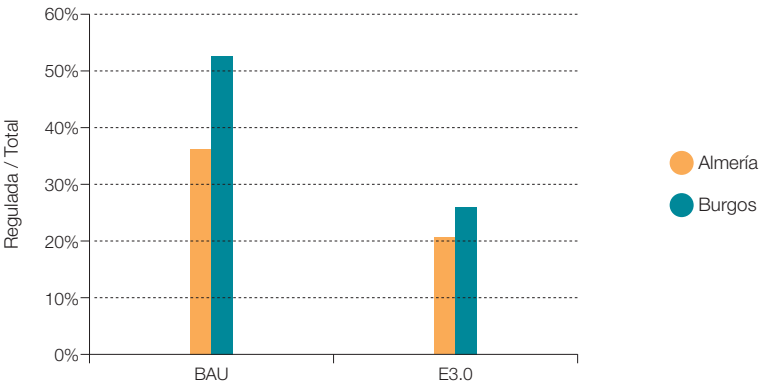


Figura 415. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Supermercado.



del 40%, y baja al 20% para el contexto E3.0. Esta situación hace altamente recomendable que las cargas de proceso se incluyan en la regulación, y que el indicador a manejar sea el de consumo de energía total, si se pretende que la regulación contribuya a proporcionar avances significativos en el nivel de eficiencia de estos edificios.

En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto a total, la figura 416

nos muestra cómo se llega a reducir esta componente de la demanda en el contexto E3.0. En efecto, el consumo de energía para climatizar pasa de ser una de las componentes más importantes de la demanda en el contexto BAU a ser la componente menos importante. A ello contribuyen por un lado la gran reducción de la demanda del edificio, y por otro lado a la gran eficiencia de las bombas de calor para cubrir esa demanda residual.

Figura 416. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Supermercado.

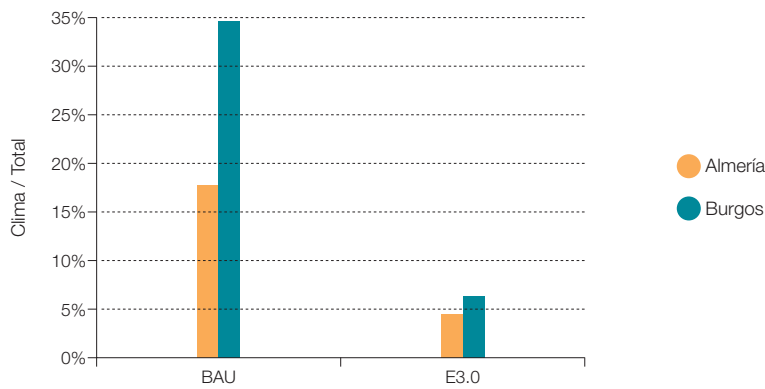


Figura 417. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Supermercado.

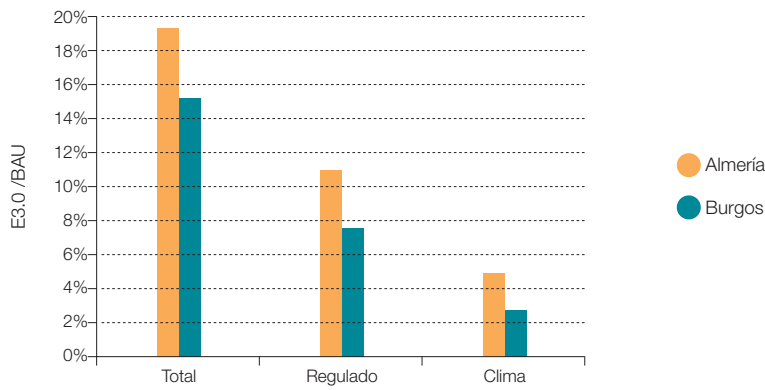
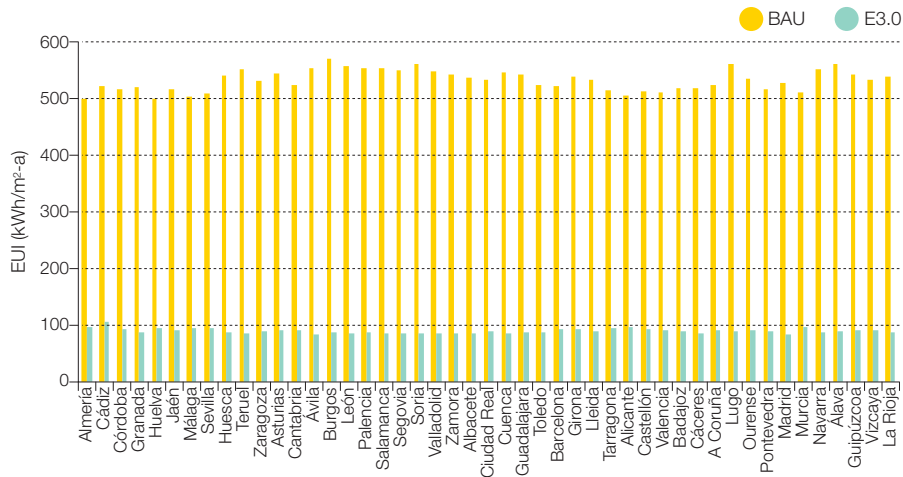


Figura 418. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Supermercado.



Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 417 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 84%, que se incrementan al considerar los ahorros en términos de energía regulada o de climatización, y llegan, para el caso de emplazamientos de elevada severidad climática de invierno⁷⁹⁵, a obtener niveles de ahorro en las demandas de energía regulada y de climatización del orden del 92% y 97% respectivamente.

Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 418 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, y se obtiene, para el contexto E3.0, una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.7 Educación

En las figuras 419 y 420 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁷⁹⁶ en los emplazamientos climáticos extremos de Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 421 y 422 nos muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

Podemos observar cómo esta tipología de edificio, ya incluso en el contexto BAU, se encuentra dominado por los consumos de iluminación y equipamiento. Al pasar al contexto E3.0 este dominio se hace todavía más contundente por la reducción de los consumos asociados a la climatización.

⁷⁹⁵ Que son aquellos que en la actualidad consumen más energía y para los cuales la regulación actual permite unos mayores niveles de consumo.
⁷⁹⁶ Descontando la aportación solar térmica local.

Figura 419. Estructura de la demanda de energía final para el centro educativo en Almería en contexto BAU.

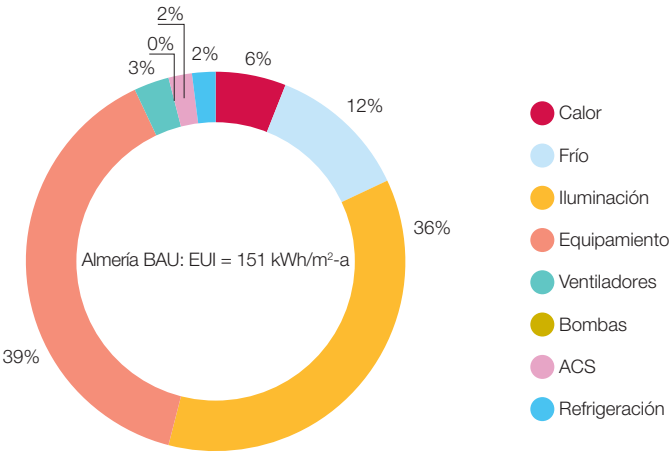


Figura 420. Estructura de la demanda de energía final para el centro educativo en Burgos en contexto BAU.

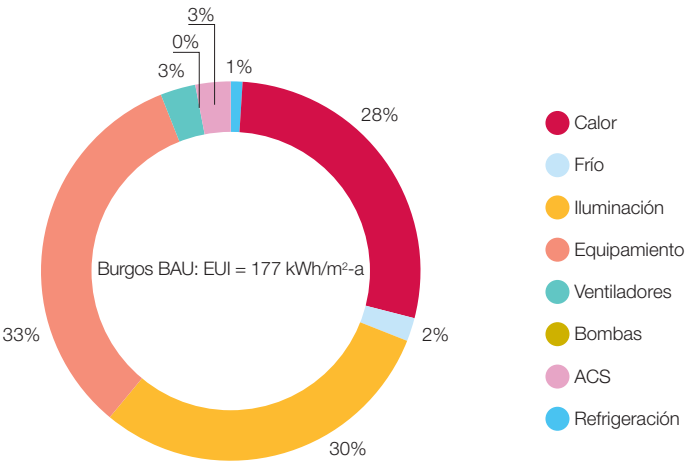


Figura 421. Estructura de la demanda de energía final para el centro educativo en Almería en contexto E3.0.

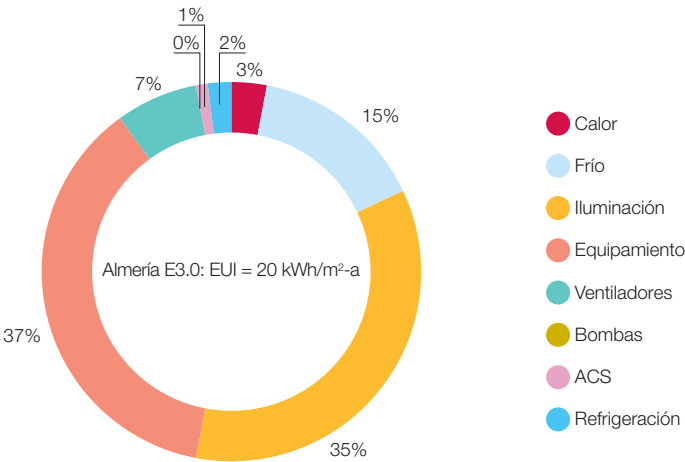
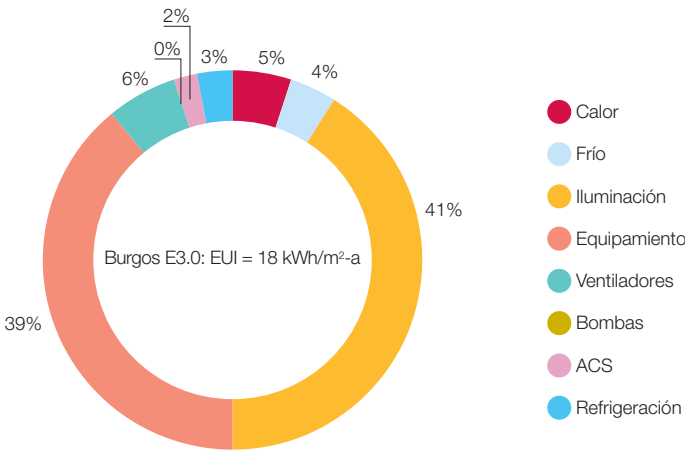


Figura 422. Estructura de la demanda de energía final para el centro educativo en Burgos en contexto E3.0.



En la figura 423 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. En el caso de los edificios terciarios, la parte regulada incluye la energía para iluminación. La parte del consumo energético que queda fuera del al-

cance de la regulación es significativa, y se acentúa en el contexto E3.0 en el que alcanza valores del orden del 40%. Resulta por tanto apropiado incorporar todos los consumos dentro del alcance de la regulación y emplear como indicador de desempeño del edificio el consumo de energía total final.

Figura 423. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Centro educativo.

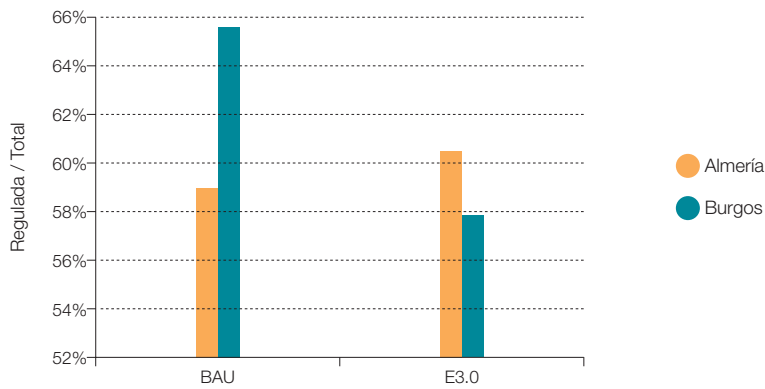
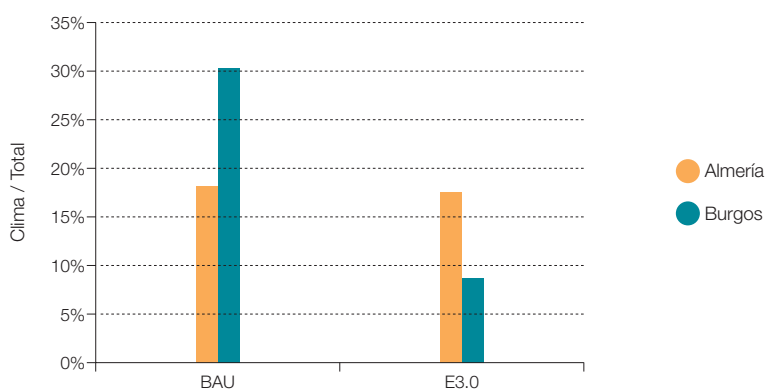


Figura 424. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Centro educativo.



En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto a total, la figura 424 nos muestra cómo se llega a reducir esta componente de la demanda en el contexto E3.0. En efecto, el consumo de energía para climatizar pasa de ser una componente relevante de la demanda en el contexto BAU a ser una componente relativamente poco importante, si bien, en los emplazamientos de elevada severidad climática de verano mantiene

el orden de magnitud de su peso relativo debido a que las medidas de eficiencia introducidas, si bien reducen la demanda absoluta de refrigeración, no consiguen reducir su valor relativo.

Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 425 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a

ser del orden del 88%, que se incrementan al considerar los ahorros en términos de energía regulada o de climatización en emplazamientos de elevada severidad climática de invierno⁷⁹⁷, y llegan, en este caso, a obtener niveles de ahorro en las demandas de energía de climatización del orden del 98%. En el caso de los emplazamientos con elevada severidad climática de verano, las medidas de eficiencia

introducidas no consiguen reducir el peso relativo de la demanda de climatización, dominada en este caso por los requerimientos de frío, motivo por el que el orden de magnitud de la reducción total, regulada y de clima, al pasar del BAU al E3.0 son parecidos.

Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía

Figura 425. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Centro educativo.

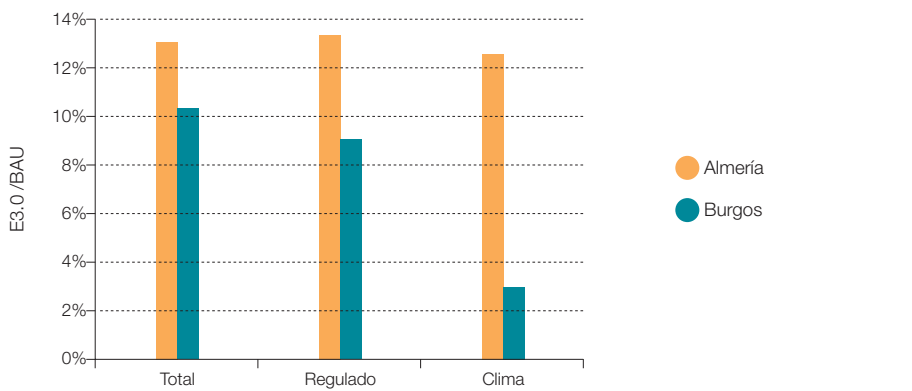
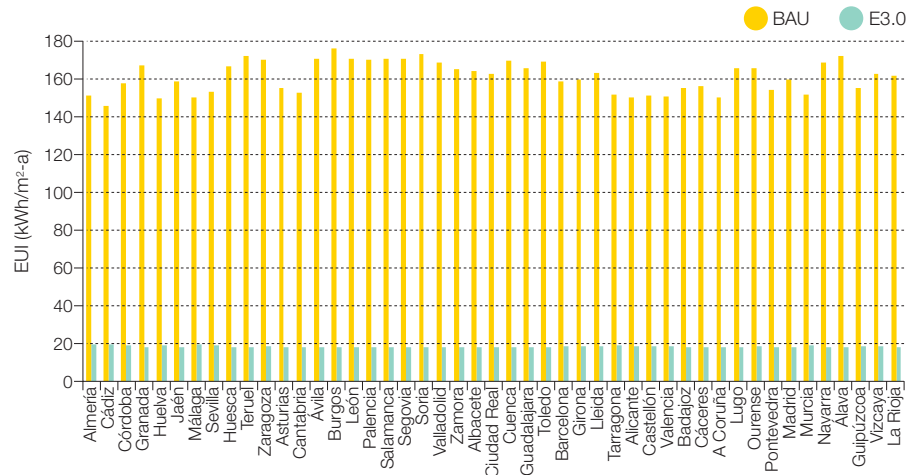


Figura 426. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Centro educativo.



797 Que son aquellos que en la actualidad consumen más energía y para los cuales la regulación actual permite unos mayores niveles de consumo.

final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 426 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, y se obtiene, para el contexto E3.0, una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.7 Hospital

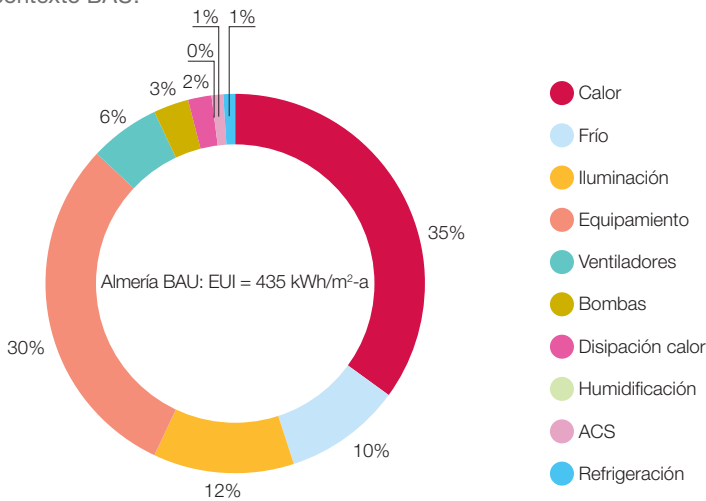
En las figuras 427 y 428 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁷⁹⁸ en los emplazamientos climáticos extremos de Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 429 y 430 nos muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

En el contexto BAU, las estrictas consignas de temperatura y los elevados periodos de operación hacen que la demanda de climatización,

y en particular la de calefacción, constituyan el componente más importante de la estructura de consumo. Al evolucionar al contexto E3.0, el consumo para climatización se reduce mucho, de tal forma que pasa a ser uno de los componentes menos importantes de la estructura de demanda, con los equipamientos que dominan la estructura de consumo.

En el caso de un hospital existe una gran cantidad de equipamiento crítico sobre el que no es directa la aplicación de medidas de eficiencia con el mismo alcance que en otros tipos de equipamiento. Sin embargo, dado que hasta la fecha el criterio de eficiencia sobre este tipo de equipamientos no ha constituido uno de los parámetros principales de diseño⁷⁹⁹, cabe esperar que exista un amplio margen de mejora⁸⁰⁰. Sin embargo, de cara a la elaboración del escenario E3.0 hemos sido conservadores en este sentido, de tal forma que en las zonas administrativas del hospital hemos aplicado ratios de mejora de eficiencia de equipamientos comparables

Figura 427. Estructura de la demanda de energía final para el hospital en Almería en contexto BAU.



⁷⁹⁸ Descontando la aportación solar térmica local.
⁷⁹⁹ Probablemente incluso menos que en otros tipos de equipamiento.
⁸⁰⁰ La extensión del concepto de salud más allá de los pacientes internos para abarcar al resto del planeta sería un motor para introducir eficiencia energética en los hospitales.

a los de otros edificios (pero algo inferiores), mientras que en las áreas críticas del hospital los ratios de mejora de la eficiencia del equipamiento que hemos introducido son mucho más conservadores⁸⁰¹.

También resaltan en los resultados aquí presentados los incrementos de peso relativo en la estructura de consumo del bombeo y la disipación de calor. Estos dos componentes presentan un margen de mejora significativo

Figura 428. Estructura de la demanda de energía final para el hospital en Burgos en contexto BAU.

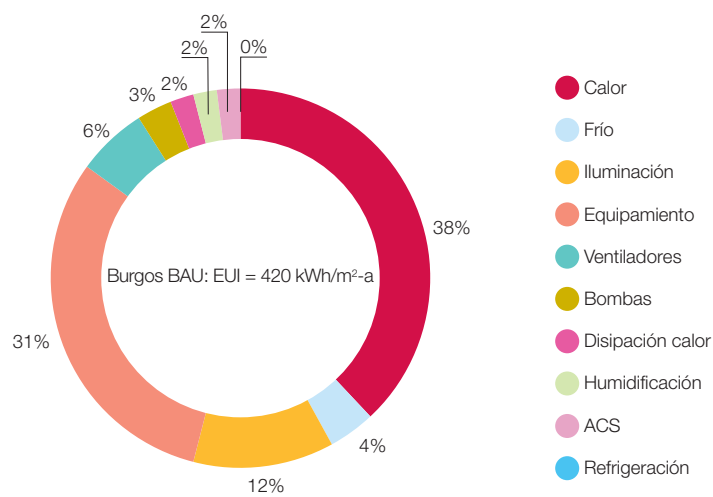
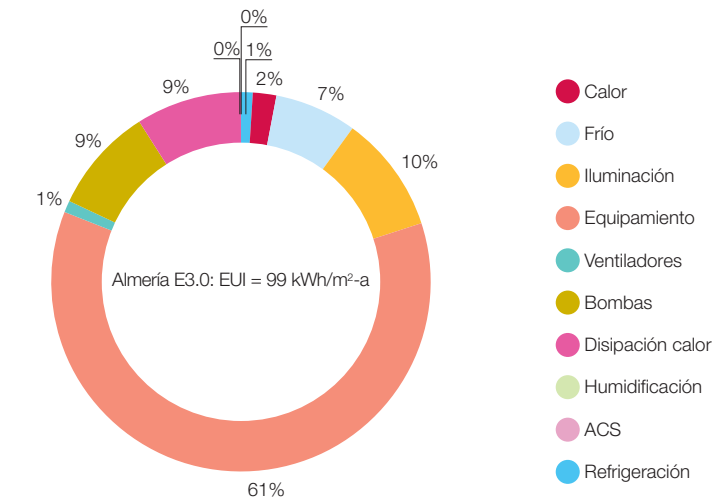


Figura 429. Estructura de la demanda de energía final para el hospital en Almería en contexto E3.0.



801 Consideramos que sería preciso desarrollar un estudio específico sobre este tipo de equipamientos para afinar más en su potencial de mejora.

no reflejado en estos resultados, pues por limitaciones de tiempo no se han introducido medidas de eficiencia adicionales en el contexto E3.0 respecto a las ya implementadas para el contexto BAU.

Estos dos aspectos conservadores del análisis, hacen que en los hospitales consideremos que existe un margen de mejora

adicional al correspondiente a los resultados aquí presentados.

En la figura 431 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. En el caso de los edificios terciarios, la parte regulada incluye la energía para iluminación.

Figura 430. Estructura de la demanda de energía final para el hospital en Burgos en contexto E3.0.

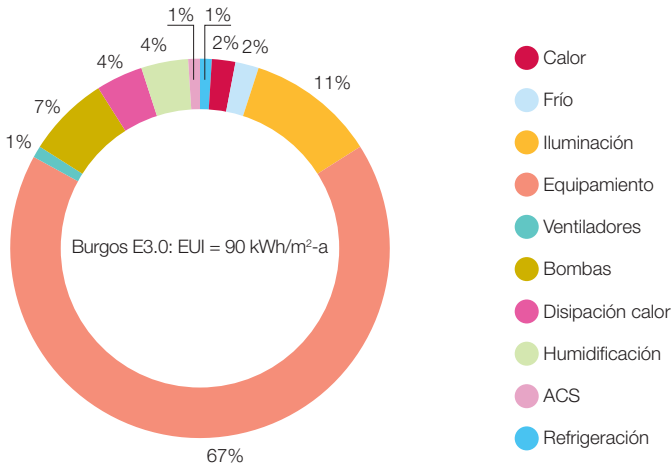
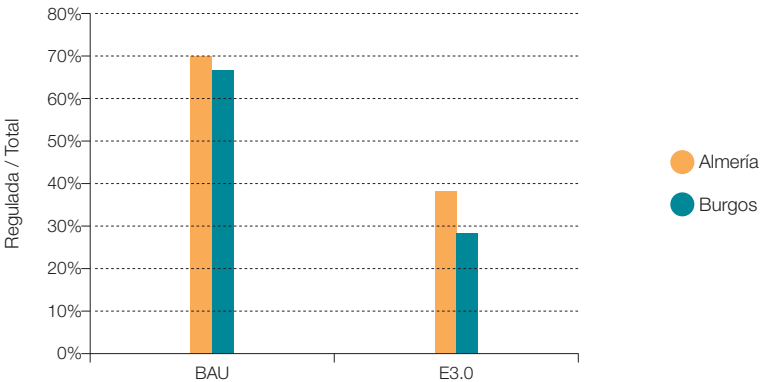


Figura 431. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Hospital.



La parte del consumo energético que queda fuera del alcance de la regulación es muy importante, y se acentúa en el contexto E3.0 en que alcanza valores del orden del 70%. Resulta por tanto apropiado incorporar todos los consumos dentro del alcance de la regulación empleando como indicador de desempeño del edificio el consumo de energía total final.

En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto al total, la figura 432 nos muestra cómo se llega a reducir esta componente de la demanda en el contexto E3.0. En efecto, el consumo de energía para climatizar pasa de ser la componente principal de la demanda en el contexto BAU a ser una de las componentes menos importantes en el contexto E3.0. La reducción de la demanda

Figura 432. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Hospital.

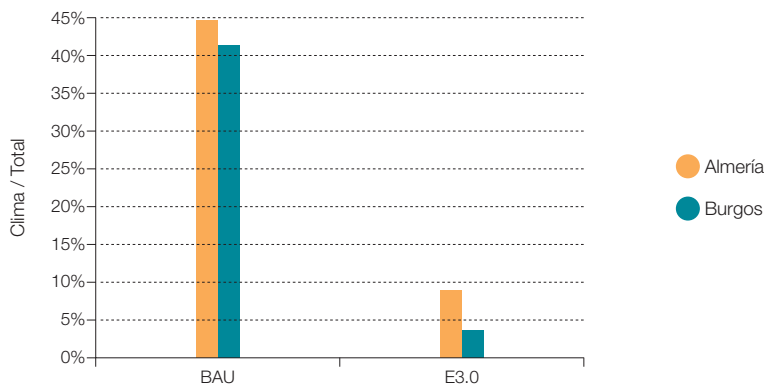
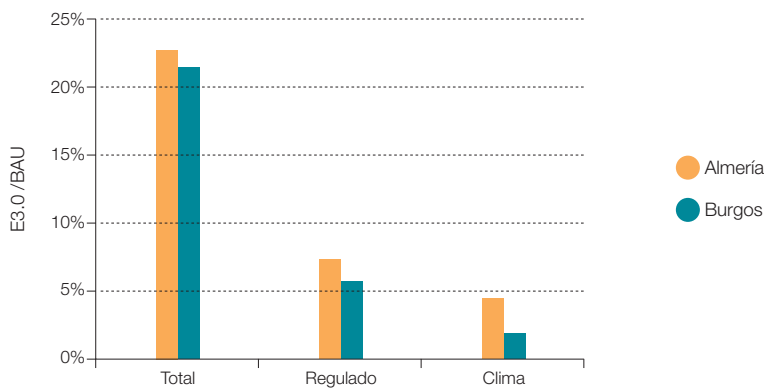


Figura 433. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Hospital.



por aplicación de niveles de aislamiento adecuados, y la gran eficiencia de las bombas de calor para cubrir la demanda residual son los responsables de este resultado.

Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 433 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 80%, que se incrementan al considerar los ahorros en términos de energía regulada o de climatización, especialmente en emplazamientos de elevada severidad climática de invierno⁸⁰², y llegan, en este caso, a obtener niveles de ahorro en las demandas de energía de climatización del orden del 98%.

Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 434 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en

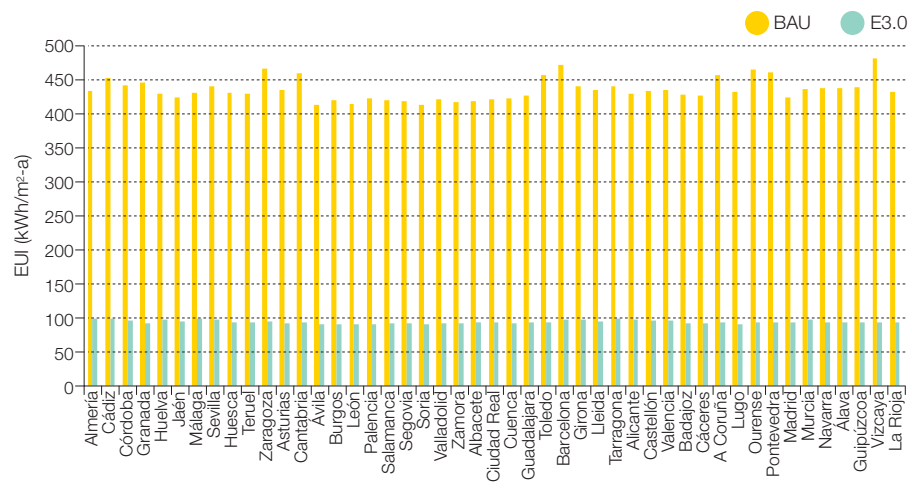
todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, y se obtiene para el contexto E3.0 una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.8 Restaurante

En las figuras 435 y 436 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁸⁰³ en los emplazamientos climáticos extremos de Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 437 y 438 nos muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

Lo que más resalta de estos resultados es el dominio de los equipamientos en la estructura de consumo energético de esta tipología de edificio, incluso en el contexto BAU, pero que en el contexto E3.0, tras la aplicación de

Figura 434. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Hospital.



⁸⁰² Que son aquellos que en la actualidad consumen más energía y para los cuales la regulación actual permite unos mayores niveles de consumo.
⁸⁰³ Descontando la aportación solar térmica local.

medidas de eficiencia que reducen de forma muy importante la demanda de climatización y la de iluminación, el dominio de los equipamientos se acentúa todavía mucho más.

Figura 435. Estructura de la demanda de energía final para el restaurante en Almería en contexto BAU.

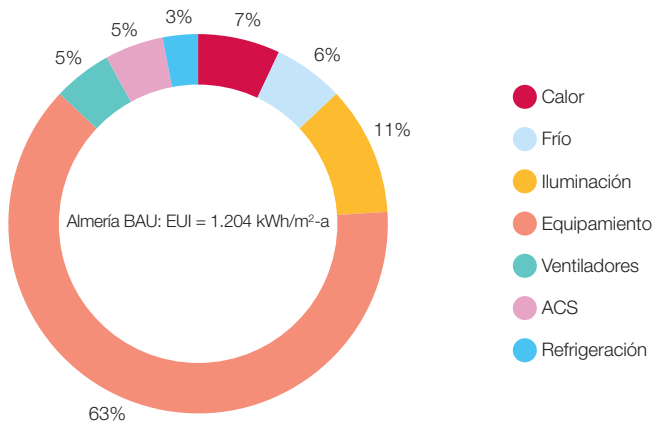


Figura 436. Estructura de la demanda de energía final para el restaurante en Burgos en contexto BAU.

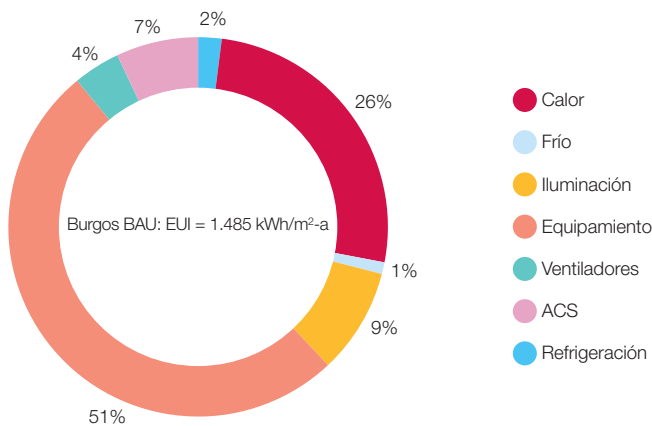


Figura 437. Estructura de la demanda de energía final para el restaurante en Almería en contexto E3.0.

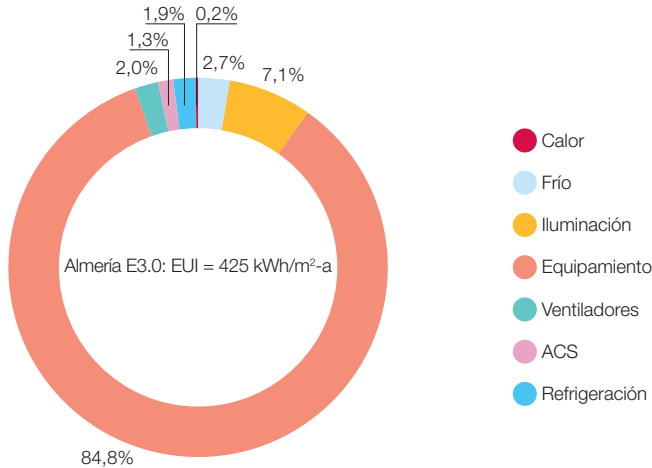


Figura 438. Estructura de la demanda de energía final para el restaurante en Burgos en contexto E3.0.

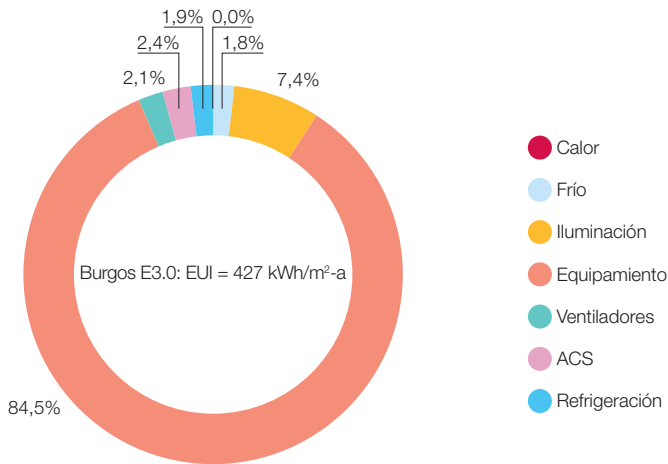


Figura 439. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Restaurante.

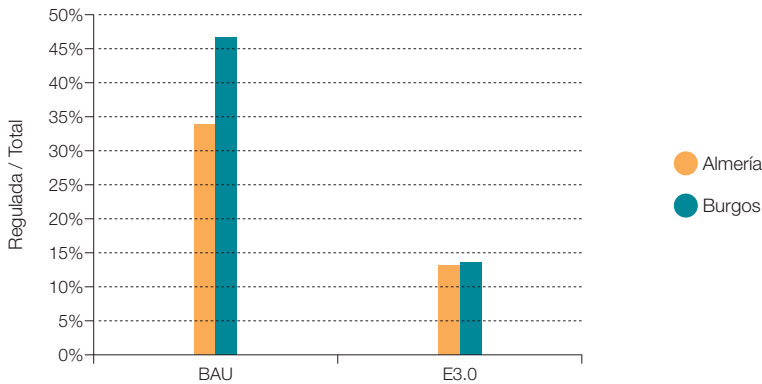
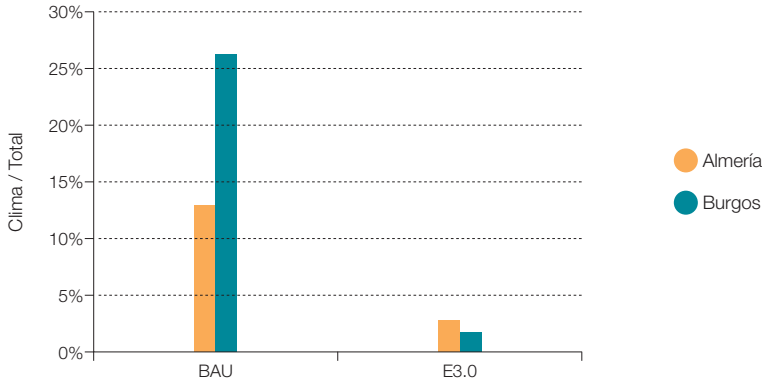


Figura 440. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Restaurante.



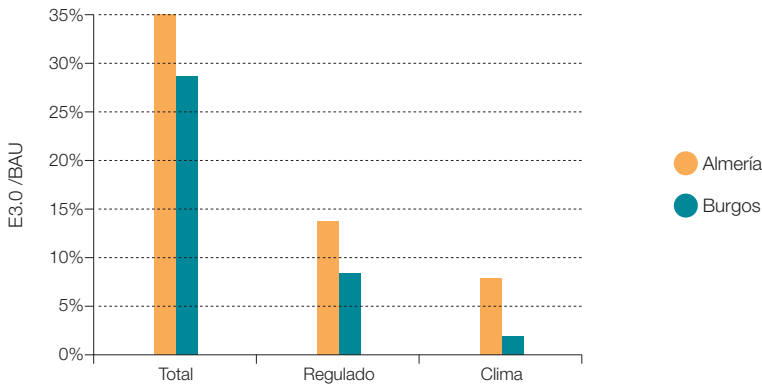
En la figura 439 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. En el caso de los edificios terciarios, la parte regulada incluye la energía para iluminación. La parte del consumo energético que queda fuera del alcance de la regulación es muy importante, y se acentúa en el contexto E3.0 en el que alcanza valores del orden del 85%. Resulta por tanto apropiado incorporar todos los consumos dentro del alcance de la regulación empleando

como indicador de desempeño del edificio el consumo de energía total final.

En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto a total, la figura 440 nos muestra cómo se llega a reducir esta componente de la demanda en el contexto E3.0. En efecto, el consumo de energía para climatizar pasa de ser una componente importante de la demanda en el contexto BAU⁸⁰⁴, a prácticamente desaparecer en el contexto E3.0. La reducción de la demanda

⁸⁰⁴ Especialmente en climas de elevada severidad climática de invierno.

Figura 441. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Restaurante.

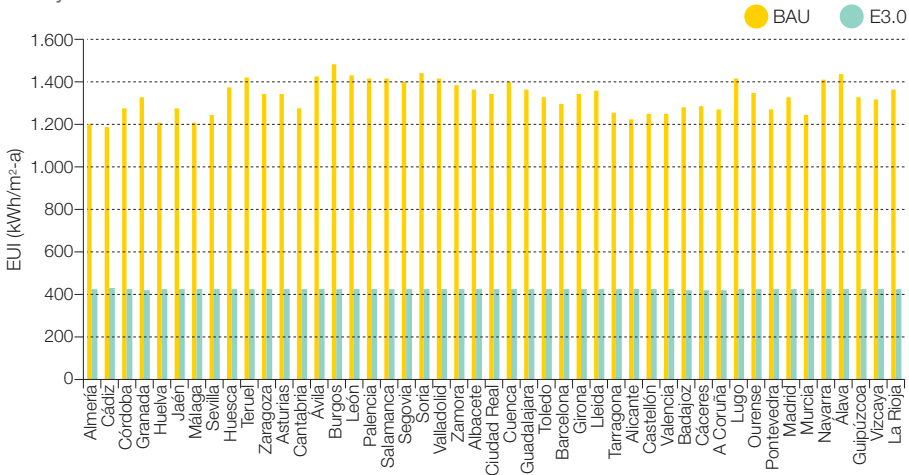


por aplicación de niveles de aislamiento adecuados, la implementación de procesos recuperativos, y la gran eficiencia de las bombas de calor para cubrir la demanda residual son los responsables de este resultado.

Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la

figura 441 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 70%⁸⁰⁵, que se incrementan al considerar los ahorros en términos de energía regulada o de climatización, especialmente en emplazamientos de elevada severidad climática de invierno⁸⁰⁶, y llegan en este caso a obtener niveles de ahorro

Figura 442. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Restaurante.



⁸⁰⁵ Este valor es inferior al alcanzado en otros emplazamientos por el gran dominio de la demanda de equipamientos de proceso con un menor margen de mejora.

⁸⁰⁶ Que son aquellos que en la actualidad consumen más energía y para los cuales la regulación actual permite unos mayores niveles de consumo.

en las demandas de energía de climatización del orden del 98%.

Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 442 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, obteniendo

para el contexto E3.0 una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.9 Almacén

En las figuras 443 y 444 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁸⁰⁷ en los emplazamientos climáticos extremos de

Figura 443. Estructura de la demanda de energía final para el almacén en Almería en contexto BAU.

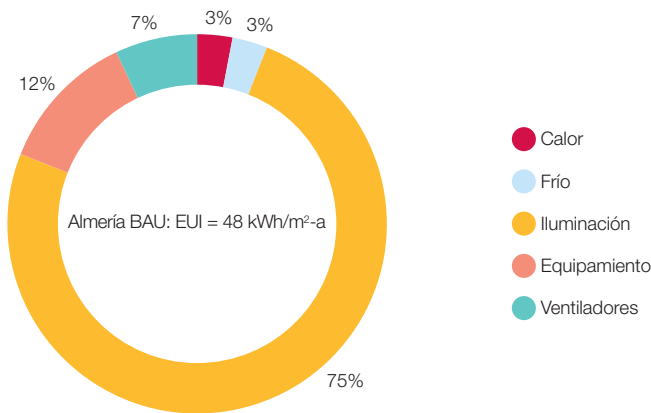
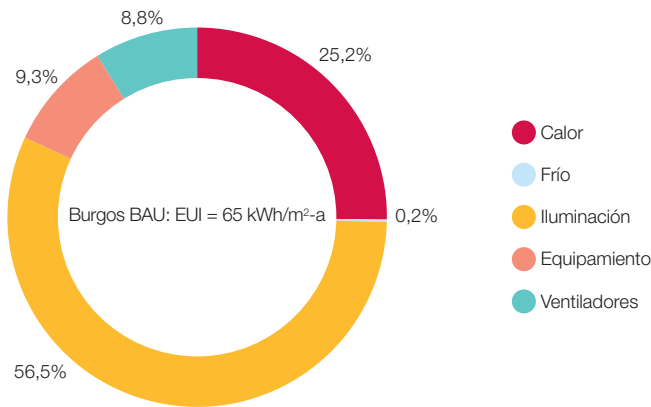


Figura 444. Estructura de la demanda de energía final para el almacén en Burgos en contexto BAU.



807 Descontando la aportación solar térmica local.

Figura 445. Estructura de la demanda de energía final para el almacén en Almería en contexto E3.0.

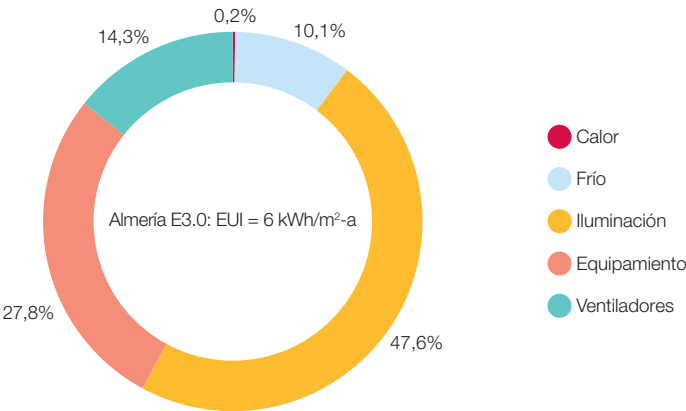
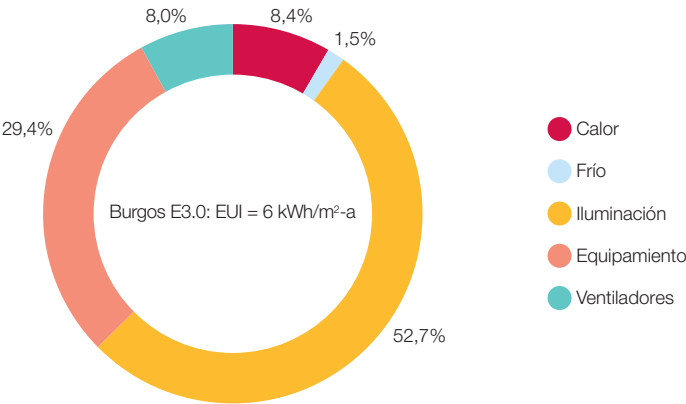


Figura 446. Estructura de la demanda de energía final para el almacén en Burgos en contexto E3.0.



Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 445 y 446 nos muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

Como podemos ver, esta tipología de edificio está dominada por el consumo de iluminación, si bien en el contexto BAU la demanda de calefacción en emplazamientos de elevada severidad climática proporciona una contribución significativa.

Figura 447. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Almacén.

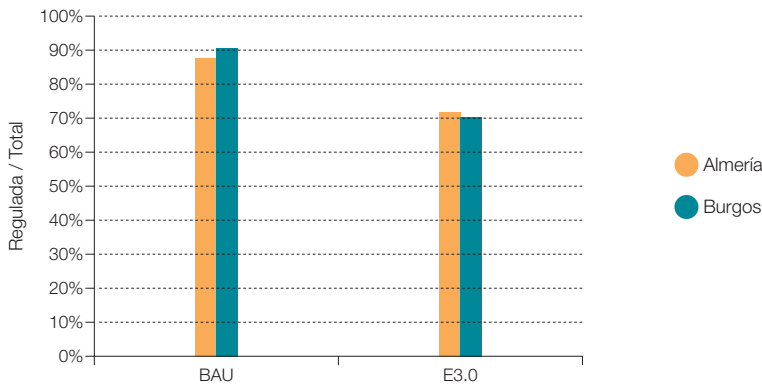
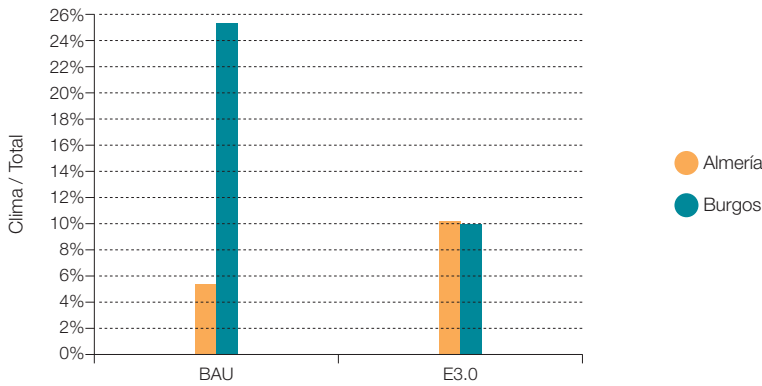


Figura 448. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Almacén.



En la figura 447 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. En el caso de los edificios terciarios, la parte regulada incluye la energía para iluminación. Dada la estructura de consumos de esta tipología de edificios, en el contexto BAU la energía regulada representa del orden del 90% de la energía final total. Sin embargo, en el contexto E3.0 este porcentaje desciende hasta el 70%,

dejando fuera del alcance de la energía regulada una parte importante del consumo final.

En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto a total, la figura 448 nos muestra cómo evoluciona esta componente de la demanda en el contexto E3.0.

Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 449 podemos observar cómo en términos de

Figura 449. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Almacén.

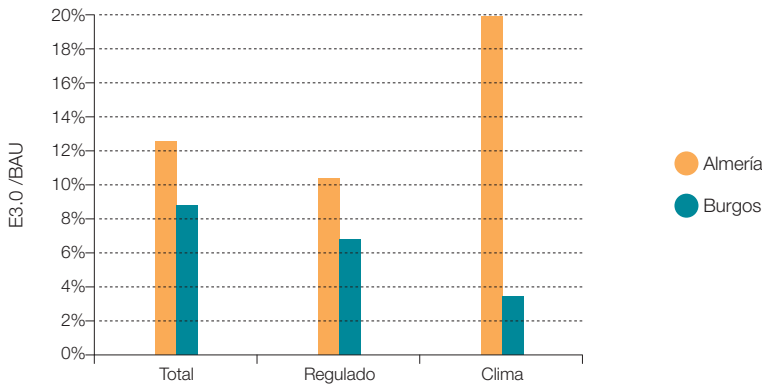
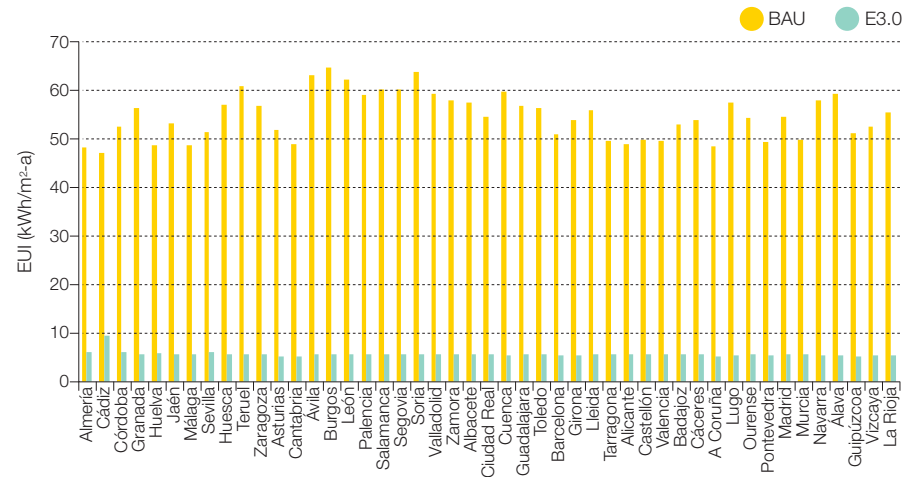


Figura 450. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Almacén.



energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 90%.

Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 450 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en

todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, que obtienen para el contexto E3.0 una distribución muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.1.10 Hotel

En las figuras 451 y 452 mostramos la estructura de la demanda final de energía⁸⁰⁸ en los emplazamientos climáticos extremos de Almería y Burgos para el contexto BAU, mientras que las figuras 453 y 454 nos muestran las correspondientes demandas de energía en estos dos emplazamientos climáticos para el contexto E3.0.

Como podemos ver esta tipología de edificio está dominada por el consumo de equipamientos, especialmente en el contexto E3.0 al reducirse de forma muy importante otros componentes de peso en el BAU (climatización, iluminación y ACS).

Figura 451. Estructura de la demanda de energía final para el hotel en Almería en contexto BAU.

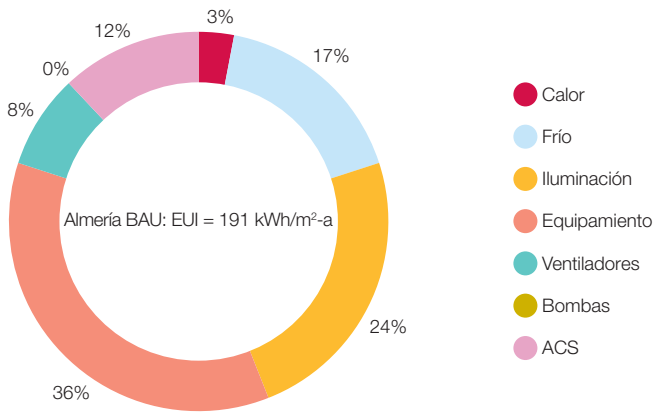
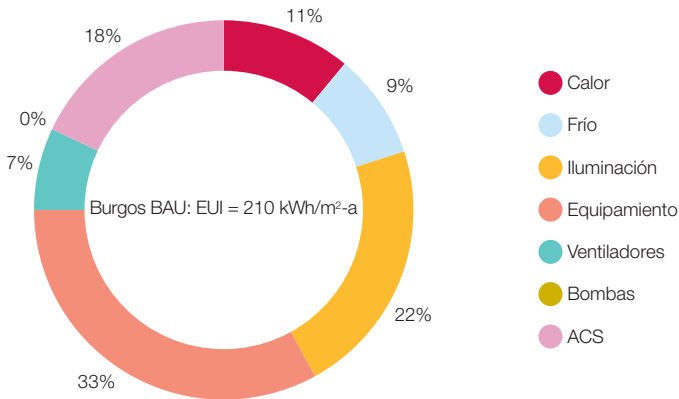


Figura 452. Estructura de la demanda de energía final para el hotel en Burgos en contexto BAU.



⁸⁰⁸ Descontando la aportación solar térmica local.

Figura 453. Estructura de la demanda de energía final para el hotel en Almería en contexto E3.0.

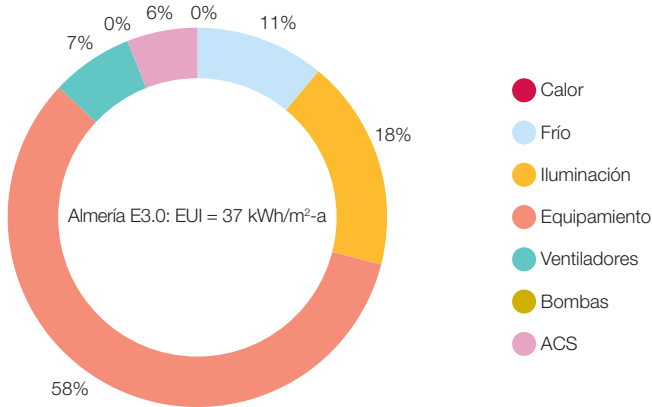


Figura 454. Estructura de la demanda de energía final para el hotel en Burgos en contexto E3.0.

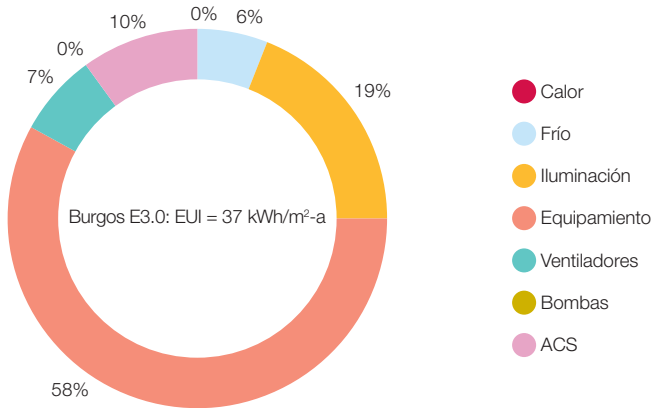


Figura 455. Fracción de consumo de energía regulado respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Hotel.

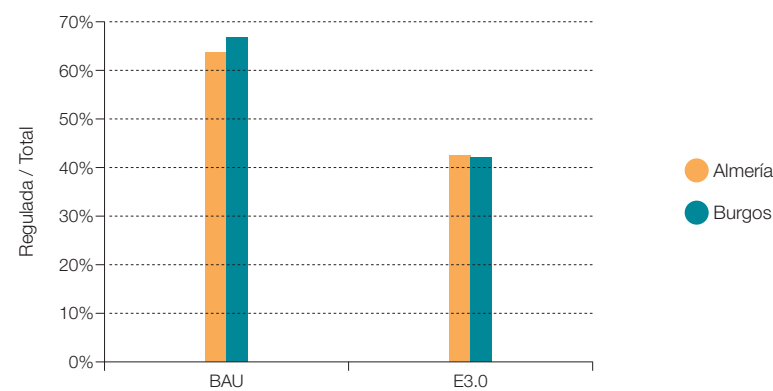
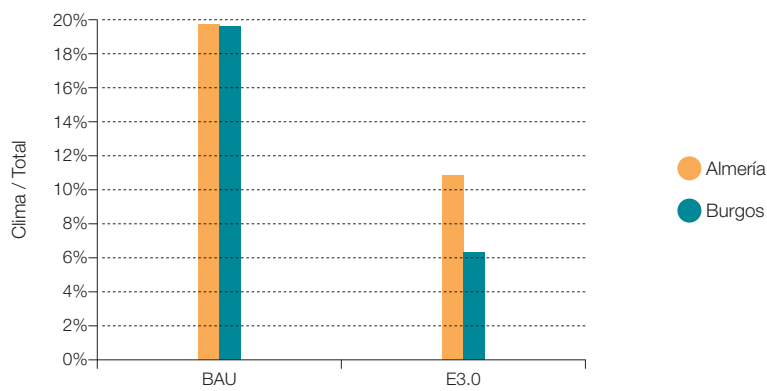


Figura 456. Fracción de consumo de energía para climatización respecto al total, para los contextos BAU y E3.0. Hotel.



En la figura 455 presentamos el ratio entre energía regulada y energía total y su evolución al pasar del contexto BAU al E3.0 en estos dos emplazamientos climáticos. En el caso de los edificios terciarios, la parte regulada incluye la energía para iluminación. Las componentes reguladas constituyen tan solo el 60% y el 40% en los contextos BAU y E3.0 respectivamente. Por tanto es importante centrar tanto los análisis como la

regulación destinados a explotar el potencial de la eficiencia, en el consumo total.

En el caso de analizar el ratio entre energía para climatizar respecto a total, la figura 456 nos muestra cómo evoluciona esta componente de la demanda en el contexto E3.0.

Figura 457. Fracción de consumo de energía total, regulada y de climatización del contexto E3.0 respecto al contexto BAU. Hotel.

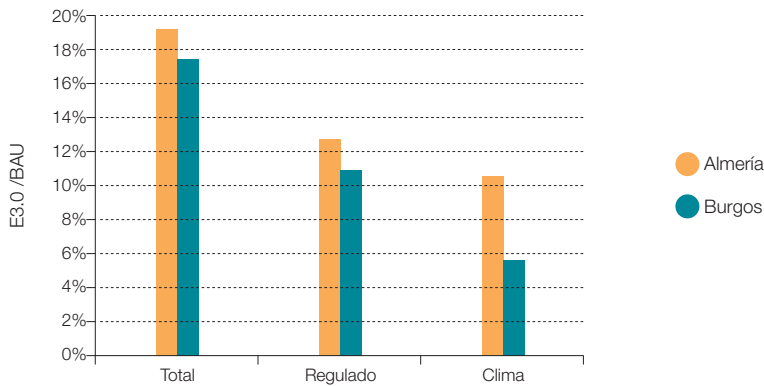
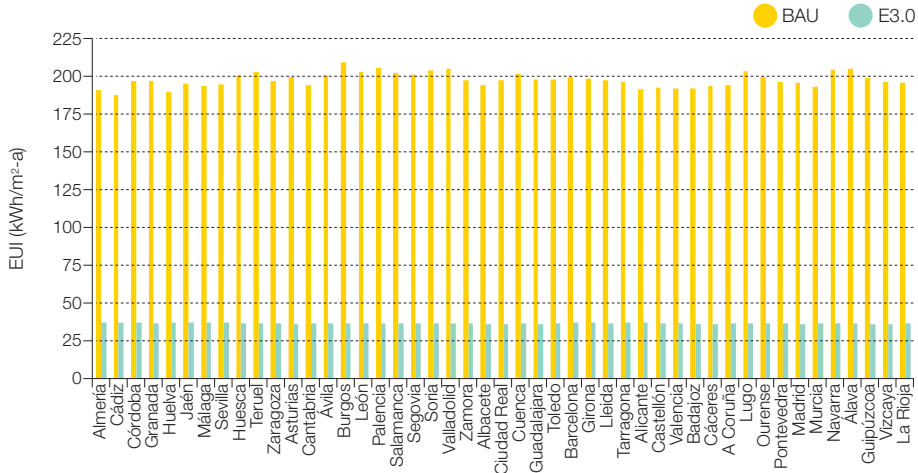


Figura 458. Distribución provincial del consumo de energía final total para los contextos BAU y E3.0. Hotel.



Por lo que respecta al incremento de eficiencia al pasar del contexto BAU al E3.0, en la figura 457 podemos observar cómo en términos de energía total los ahorros alcanzados llegan a ser del orden del 82%, y llegan a ser del orden del 94% en términos de consumo para climatización en emplazamientos de elevada severidad climática.

Finalmente, por lo que respecta a la distribución provincial del consumo total de energía final, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, la figura 458 recoge los resultados correspondientes. Como podemos observar, en todos los emplazamientos climáticos se alcanza un elevado nivel de ahorro, y se obtienen para el contexto E3.0 una distribución

muy homogénea del consumo total de energía de esta tipología de edificios.

3.7.7.2 Escenarios totales sector edificación

3.7.7.2.1 Escenarios totales BAU

En primer lugar vamos a recopilar los valores correspondientes a los escenarios de demanda

total⁸⁰⁹ del sector edificación para el contexto BAU, y compararlos con los valores correspondientes a otros escenarios desarrollados con anterioridad, para ilustrar el hecho de que los BAU aquí presentados son ya más eficientes⁸¹⁰ que los BAU de escenarios anteriores.

Para el caso de la edificación residencial, formada por sus dos modos⁸¹¹, en la figura 459 recogemos los valores totales de consumo

Figura 459. Consumo total del sector residencial en el escenario BAU para el año 2050.

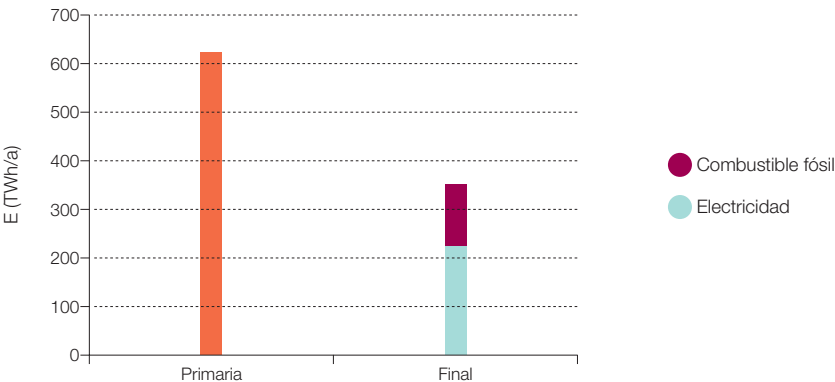
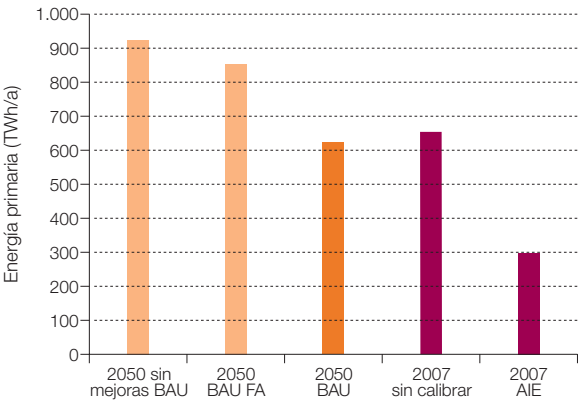


Figura 460. Comparación del escenario BAU 2050 para el sector edificación residencial con otros escenarios BAU y con las condiciones actuales del parque de edificios.



⁸⁰⁹ Con fines de comparar los resultados, a menos que se indique lo contrario, los valores presentados en este punto no tienen en cuenta las aportaciones autónomas de energía solar térmica. Es decir, la demanda de ACS incluida es la total sin descontar el aporte de la solar térmica autónoma al ACS.

⁸¹⁰ Esta mejora en los escenarios BAU es una tendencia que también se puede apreciar en los escenarios de la AIE, y es un reflejo de que el concepto del caso BAU va evolucionando en el tiempo hacia niveles de eficiencia mayor, en parte impulsado por los escenarios eficientes que se desarrollan en paralelo con los escenarios BAU.

⁸¹¹ Vivienda en bloque y unifamiliar.

energético, en términos de energía primaria⁸¹² y de energía final.

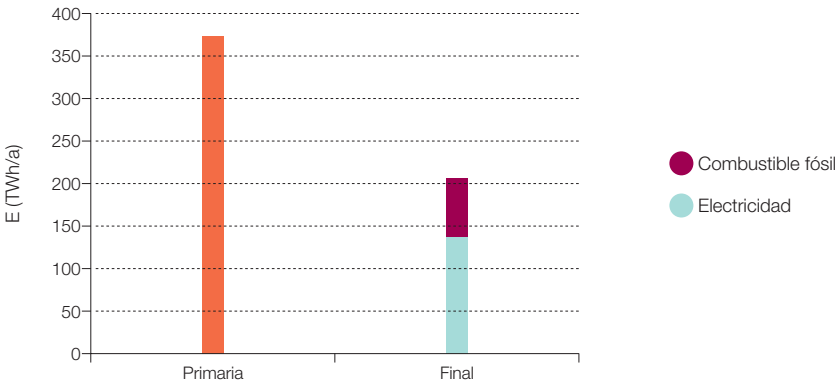
Conviene analizar con cierta perspectiva este escenario BAU para el sector edificación. En la figura 460 presentamos, en términos de energía primaria, el escenario BAU 2050 aquí desarrollado, con otros dos escenarios BAU y con evaluaciones de la situación actual del parque de edificios residenciales. El escenario denominado “2050 sin mejoras BAU” se corresponde al resultado de aplicar al área de edificios en el año 2050 el consumo específico del parque de edificios residencial en el año 2007 que dedujimos el capítulo de análisis de la calificación energética. El otro escenario BAU, el denominado “2050_BAU_FA” es el desarrollado en las referencias (García Casals X., 2007-1 y 2007-2). Respecto a los resultados representativos de la situación actual, el denominado “2007 sin calibrar” es el correspondiente a la estimación del parque de edificios residencial actual que realizamos en el capítulo dedicado al análisis de la calificación energética, mientras que el valor indicado como “2007 AIE” se corresponde al dato que se deriva del balance de la AIE para el año 2007 y con el que calibramos el resultado anterior⁸¹³. Por tanto, podemos observar que el

escenario BAU 2050, aquí desarrollado, representa un consumo inferior al que tendría el parque actual si estuvieran en uso todos los edificios e internalizadas las condiciones de confort y uso de los mismos, y supone un ahorro del 32,5% sobre el nivel de consumo que correspondería a extrapolar el consumo específico actual sobre el área de edificios proyectada para el año 2050, que a su vez era del orden del BAU 2050 manejado en estudios anteriores. Desde esta perspectiva, debemos considerar el BAU aquí desarrollado como un BAU relativamente optimista.

Por lo que respecta al parque de edificios terciarios, incorporando todos sus modos, en la figura 461 recogemos el consumo agregado total para el escenario BAU 2050.

En la misma línea que el análisis desarrollado para el escenario BAU residencial, la figura 462 nos muestra la comparación del escenario BAU 2050 aquí desarrollado con otros dos escenarios BAU y con la evaluación de la situación actual del parque de edificios terciarios. Como podemos observar, el ahorro del BAU aquí considerado respecto a la situación correspondiente a extrapolar el consumo

Figura 461. Consumo total del sector terciario en el escenario BAU para el año 2050.



812 Con fines comparativos con resultados anteriores, la conversión de la energía final a la primaria está realizada para las condiciones del sistema energético actual. Si hubiera una evolución del sistema energético en el contexto BAU, la conversión de energía final a primaria se modificaría, pero el resultado en términos de energía final permanecería invariante.

813 El proceso de calibrado consistió en ajustar tres factores: ratio de edificios construidos que están ocupados, factor de adaptación socioeconómica de las condiciones de confort y uso, y factor de degradación del parque actual respecto a la frontera D-E de la escala de calificación energética de edificios nuevos.

específico del parque actual supuesta internalizada toda la demanda del parque es del 18,6%, que si bien es un ahorro menor del BAU que en el caso residencial, debido al mayor peso que en los edificios terciarios tiene la energía de proceso (equipamientos), sigue representando una mejora considerable del BAU respecto a otros escenarios anteriores.

En las figuras 463 y 464 presentamos los resultados agrupados para el conjunto del sector edificación en el contexto BAU (residencial y terciario). Como vemos, el BAU aquí propuesto representa en su conjunto una mejora del 27,9% respecto a otros escenarios BAU.

Figura 462. Comparación del escenario BAU 2050 para el sector edificación terciaria con otros escenarios BAU y con las condiciones actuales del parque de edificios.

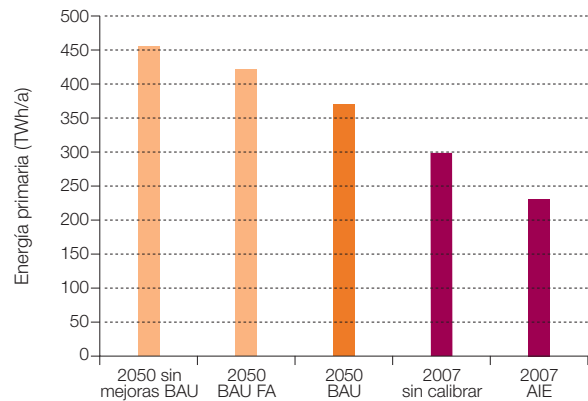
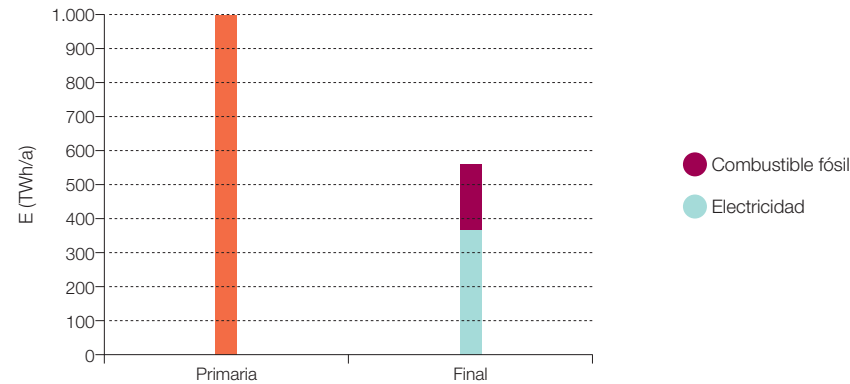


Figura 463. Consumo total del sector edificación total (residencial y terciario) en el escenario BAU para el año 2050.



En la figura 465 presentamos una comparación de los pesos relativos del sector terciario respecto al residencial en términos de superficie y de energía, para el año 2007 y para 2050 en contexto BAU. Debido a la mayor intensidad energética de los edificios terciarios respecto a los residenciales, consecuencia de los horarios más prolongados de uso y de

la mayor cantidad de equipamiento de proceso, el peso relativo en términos de energía es superior al peso relativo en términos de superficie, si bien se reduce en el año 2050 con el contexto BAU.

En términos de consumo específico del conjunto del parque de edificios, la figura 466 nos

Figura 464. Comparación del escenario BAU 2050 para el sector edificación total (residencial y terciaria) con otros escenarios BAU y con las condiciones actuales del parque de edificios.

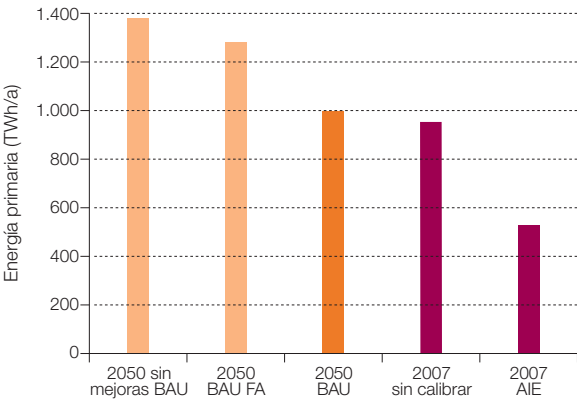
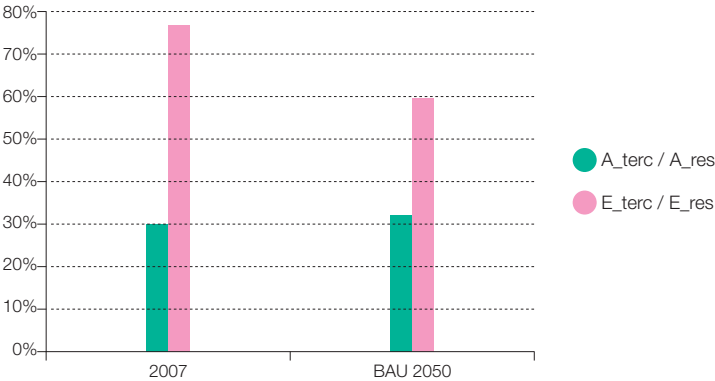


Figura 465. Comparación del peso relativo del sector terciario respecto al residencial en términos de área y de energía, para la situación actual y para el BAU 2050.



muestra la estructura del consumo referido al área construida para el escenario BAU 2050, mientras que la figura 467 presenta un posible escenario de evolución del BAU hasta el año 2050. La tendencia de este escenario es a incrementar al principio la demanda de energía a medida que se va incorporando al uso todo

el exceso de superficie construida e internalizando la demanda de confort y uso, lo cual tiene más peso que la incorporación de medidas de eficiencia. A partir de cierto instante, la incorporación de medidas de eficiencia en el BAU pasaría a dominar sobre la internalización de superficie y consumo, y conduciría a

Figura 466. Estructura del consumo específico del conjunto del parque de edificios en el BAU 2050.

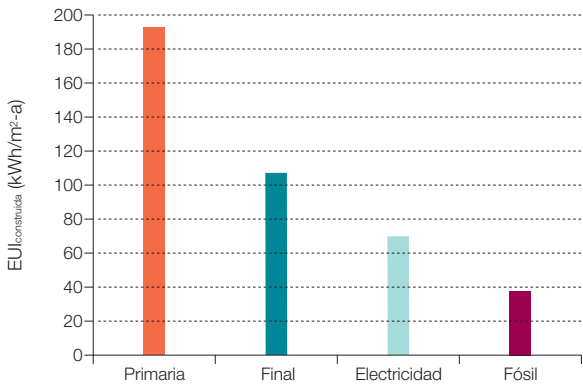


Figura 467. Escenario de evolución del consumo específico de energía primaria del parque de edificios BAU hasta el año 2050.

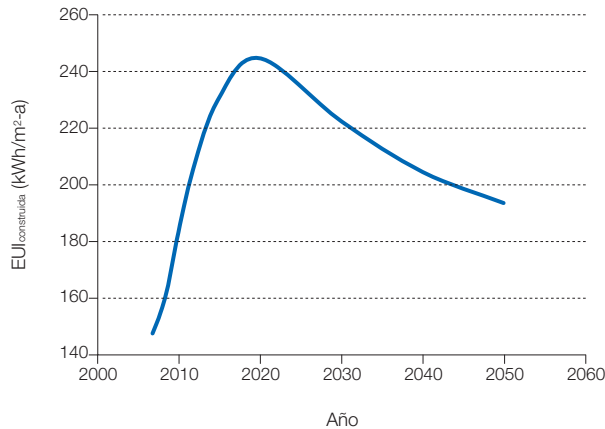
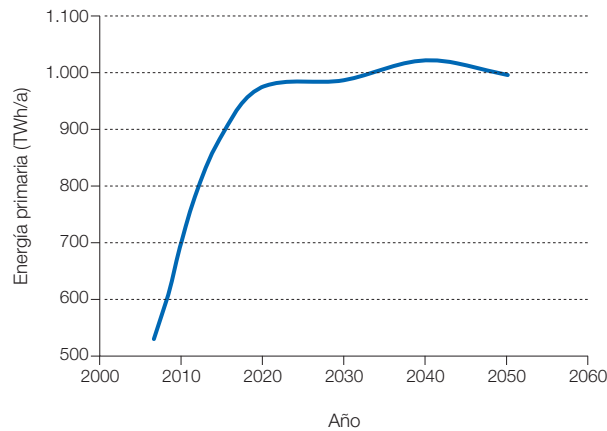


Figura 468. Escenario de evolución del consumo absoluto de energía primaria del parque de edificios BAU hasta el año 2050.



una atenuación del consumo específico del sector edificación. Al tener en cuenta la evolución de la superficie construida, el escenario de evolución BAU de la demanda en el sector edificación pasaría a ser como el indicado en la figura 468.

3.7.7.2.2 Escenarios totales E3.0

En este punto recogemos los escenarios E3.0, y los comparamos con los BAU, en su forma final, descontando las aportaciones de la solar térmica autónoma para cobertura parcial de la demanda de ACS⁸¹⁴. Los resultados los presentamos en términos de energía final⁸¹⁵ consumida por los edificios, descomponiendo ésta entre electricidad y combustible.

En la figura 469 mostramos los resultados finales acumulados para el subsector de la edificación residencial, comparando los contextos BAU y E3.0, y añadimos una comparación con la situación en el año 2007, mientras que la figura 470 nos presenta el correspondiente reparto modal, y la figura

471 la distribución provincial del consumo de energía final. Como podemos ver el ahorro alcanzado gracias a la introducción de medidas de eficiencia es tal, que el consumo de energía final en el contexto E3.0 es un 21% del consumo de energía final en el contexto BAU, pero además, el consumo de electricidad en el contexto E3.0 es tan solo un 31% del consumo de electricidad en el contexto BAU, por lo que la integración del subsector residencial en el sistema energético, mediante la electrificación total en el contexto E3.0, lejos de suponer una sobrecarga para el sistema eléctrico, conduce a una menor demanda eléctrica que el caso BAU gracias a las medidas de eficiencia incorporadas. De hecho, tal y como podemos observar al comparar la demanda E3.0 con la estructura de la demanda del subsector edificación residencial en el año 2007, la demanda de electricidad E3.0 es incluso inferior a la demanda de electricidad del año 2007, y por tanto deja hueco en el sistema eléctrico para la integración de otros sectores como el de transporte sin introducir grandes requerimientos de ampliación de la capacidad de generación y transporte del sistema eléctrico, al mismo tiempo que se

⁸¹⁴ En el apartado anterior presentamos los resultados BAU sin incorporar la aportación autónoma de la solar térmica con el fin de poder comparar con otros escenarios en términos de la demanda total de energía final. En este punto descontamos la aportación autónoma de la solar térmica para obtener el requerimiento de energía sobre el sistema interconectado.

⁸¹⁵ Pues a diferencia de la comparación en términos de energía primaria, la comparación en términos de energía final es independiente de la estructura del sistema de generación, que es otra variable que diferenciará los contextos BAU y E3.0.

Figura 469. Resultados acumulados de consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0 del subsector edificación residencial.

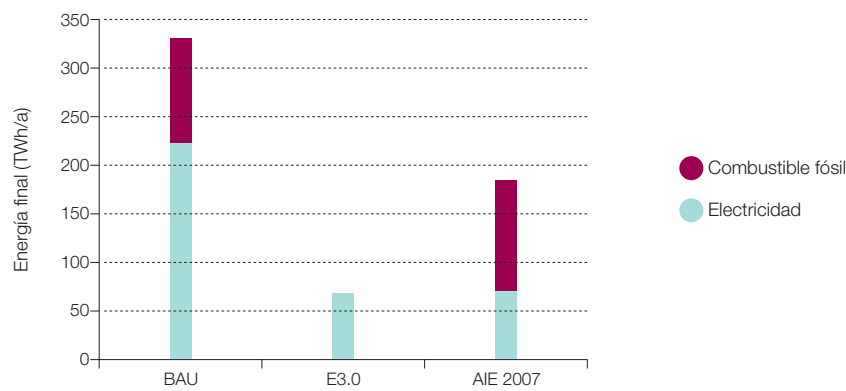
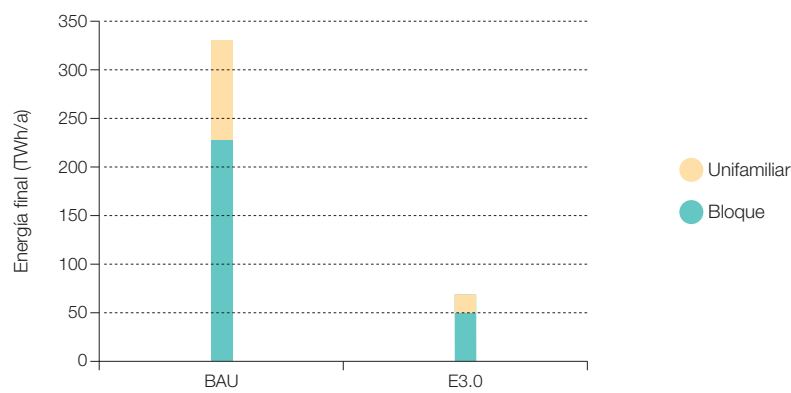


Figura 470. Reparto modal de consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0 del subsector edificación residencial.



elimina el consumo de combustibles fósiles que encontramos tanto en la actualidad como en el BAU.

En la figura 472 mostramos los resultados finales acumulados para el subsector de la edificación terciario, comparando los contextos BAU y E3.0, y añadiendo una comparación con la situación en el año 2007. Como podemos ver el ahorro alcanzado gracias a la introducción de

medidas de eficiencia es tal que el consumo de energía final en el contexto E3.0 es un 17% del consumo de energía final en el contexto BAU, pero además, el consumo de electricidad en el contexto E3.0 es tan solo un 26% del consumo de electricidad en el contexto BAU, por lo que la integración del subsector comercial en el sistema energético mediante la electrificación total en el contexto E3.0, lejos de suponer una sobrecarga para el sistema eléctrico, conduce a

una menor demanda eléctrica que el caso BAU. Es más, tal y como podemos observar, la demanda de electricidad en el contexto E3.0 es muy inferior a la existente en el año 2007, de tal forma que, además de eliminar el consumo de combustible fósil, la integración y electrificación de este subsector deja hueco incluso en el sistema eléctrico actual para cubrir la demanda de

otros sectores (como el transporte) sin introducir requerimientos adicionales de potencia de generación y capacidad de transporte.

En la figura 473 recogemos el reparto modal del consumo de energía final en el subsector de edificación terciario, y en la figura 474 el correspondiente reparto provincial.

Figura 471. Distribución provincial del consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0 del subsector edificación residencial.

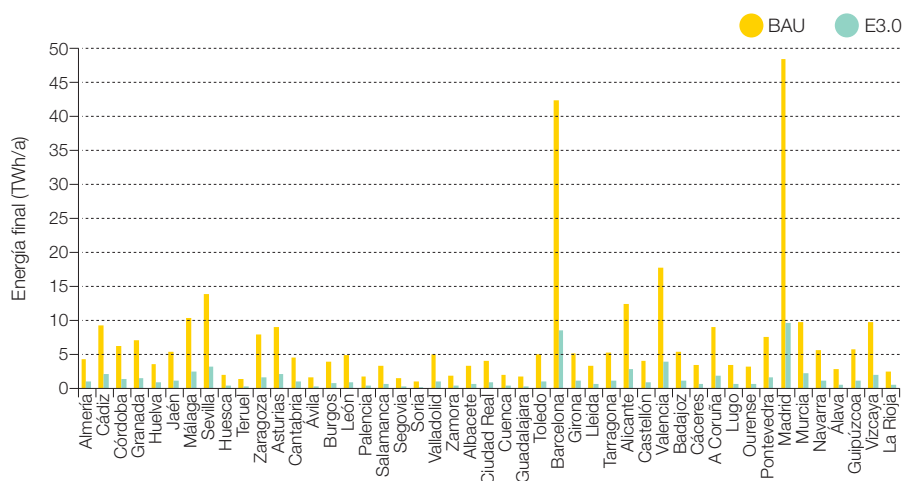


Figura 472. Resultados acumulados de consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0 del subsector edificación terciaria.

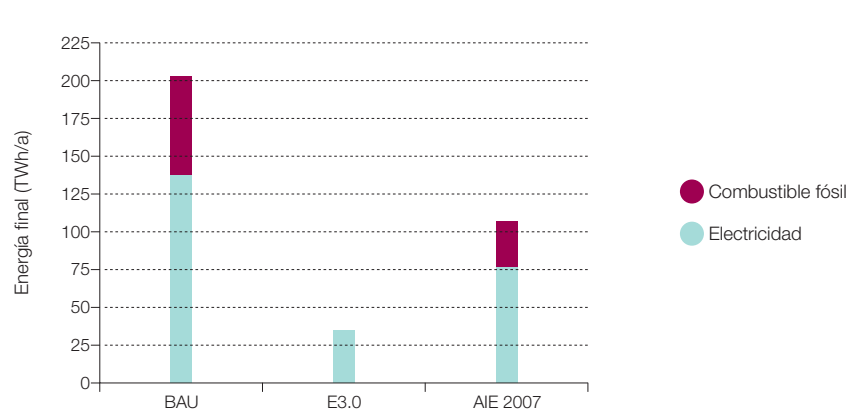


Figura 473. Reparto modal de consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0 del subsector edificación terciario.

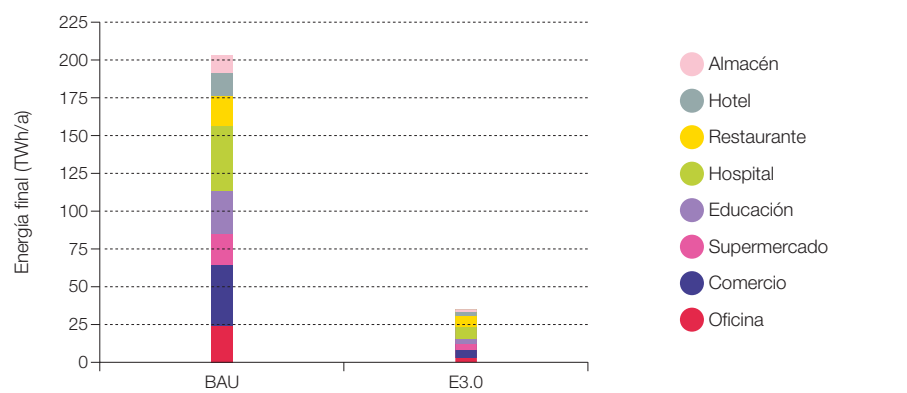
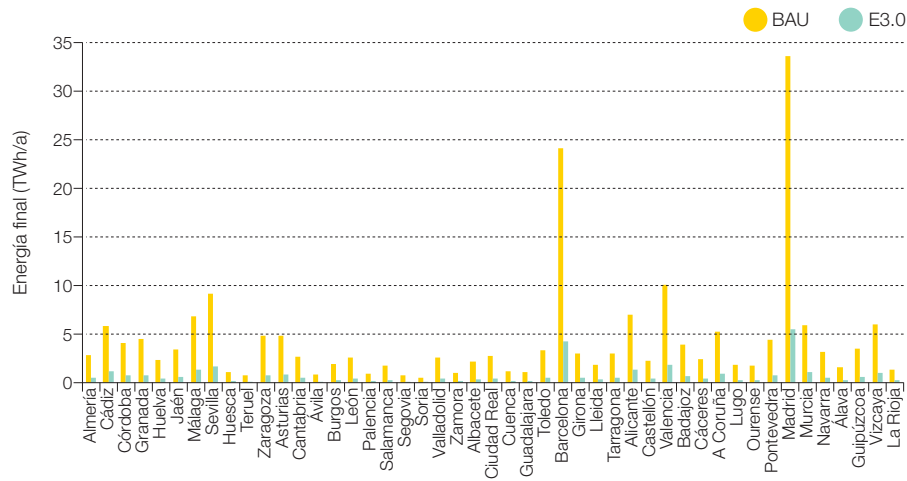


Figura 474. Distribución provincial del consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0 del subsector edificación terciario.



En la figura 475 mostramos los resultados finales acumulados para el conjunto del sector edificación, comparando los contextos BAU y E3.0, y añadiendo una comparación con la situación en el año 2007. Como podemos ver el ahorro alcanzado gracias a la introducción de medidas de eficiencia es tal que el consumo de energía final en el contexto E3.0 es un 20% del consumo de energía final en el contexto

BAU, pero además, el consumo de electricidad en el contexto E3.0 es tan solo un 29% del consumo de electricidad en el contexto BAU, por lo que la integración del sector edificación en el sistema energético mediante la electrificación total en el contexto E3.0, lejos de suponer una sobrecarga para el sistema eléctrico, conduce a una menor demanda eléctrica que el caso BAU. Es más, tal y como

Figura 475. Resultados acumulados de consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0 del sector edificación.

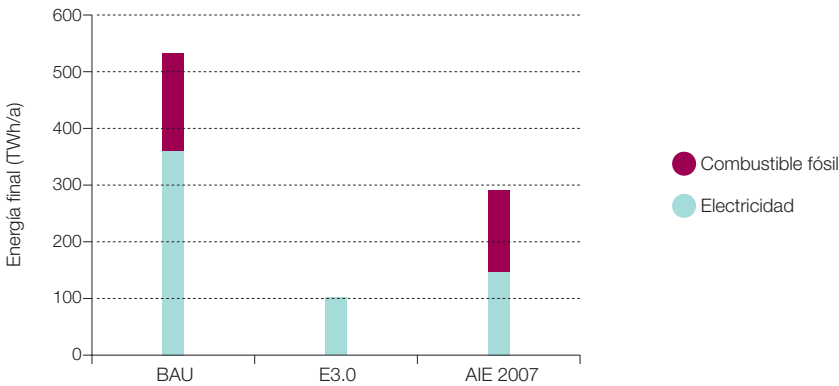


Figura 476. Reparto subsectorial de consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0, así como para el año 2007, del sector edificación.

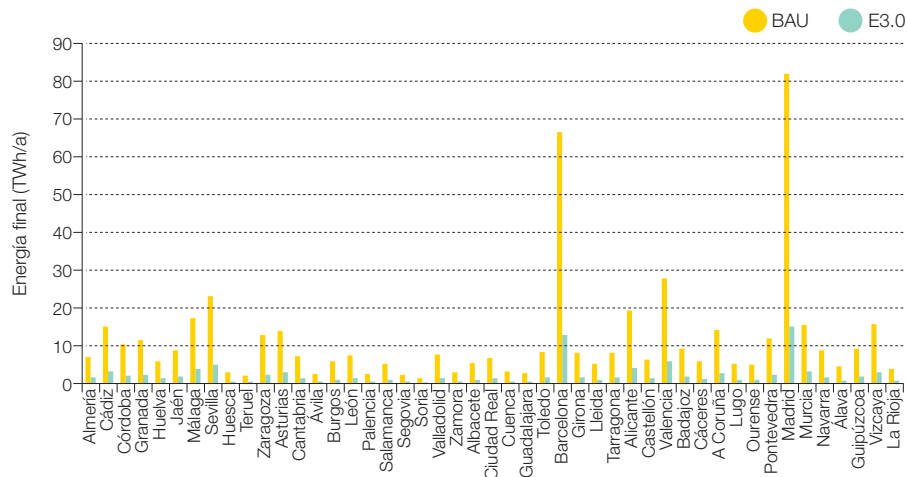


podemos observar, la demanda de electricidad en el contexto E3.0 es un 70% de la existente en el año 2007, de tal forma que además de eliminar el consumo de combustible fósil, la integración y electrificación de este sector deja hueco incluso en el sistema eléctrico actual para cubrir parcialmente la demanda de otros sectores (como el transporte) sin introducir requerimientos adicionales de potencia de generación y capacidad de transporte. En efecto, la reducción de demanda eléctrica en el contexto E3.0 es de

258 TWh/a respecto al contexto BAU, y de 44 TWh/a respecto al año 2007. Estos valores se deben comparar con la demanda total de electricidad para el sector transporte en el contexto E3.0, que como presentamos en el capítulo destinado a transporte asciende a 80 TWh/a.

En la figura 476 recogemos el reparto del consumo de energía final entre los subsectores residencial y terciario, para los contextos BAU y E3.0, así como para el año 2007.

Figura 477. Distribución provincial del consumo de energía final para los contextos BAU y E3.0 del sector edificación.



En la figura 477 presentamos el reparto provincial de consumo de energía final del sector edificación en los contextos BAU y E3.0.

3.7.8 Escenario transición de BAU a E3.0

La transición desde la situación actual al contexto E3.0 se puede desarrollar a lo largo del tiempo siguiendo distintas trayectorias según el impulso que reciban la incorporación de las medidas de eficiencia e inteligencia en el sistema energético.

En el capítulo de dedicado al sector de transporte introdujimos tres hipótesis del proceso de transición, que recogemos de nuevo en la figura 478.

El primer punto para confeccionar los escenarios de transición, según los escenarios de evolución del área de edificios construida anteriormente presentados, es confeccionar escenarios de evolución de los consumos específicos del

sector edificación, para lo cual debemos empezar por definir los puntos inicial y final de dichas trayectorias, y establecer las hipótesis de evolución a lo largo de las mismas, todo ello tanto para el contexto BAU como para las posibilidades que ofrece la tecnología en el contexto E3.0.

En la figura 479 recogemos los resultados obtenidos en este capítulo en forma de consumos específicos de energía final promedio, basados en el área útil edificada, para distintas situaciones. Los resultados los presentamos para el conjunto del sector edificación, para el conjunto del subsector residencial y para el conjunto del subsector terciario. Los resultados etiquetados como AIE 2007 se han elaborado de acuerdo con los balances de la AIE para el año 2007, y resultan por tanto representativos del parque de edificios actual⁸¹⁶. Los valores etiquetados como “potencial 2007” son los que corresponderían a la situación de que el conjunto del parque de edificios en 2007 se encontrara en uso y tuviera totalmente internalizada su demanda de servicios energéticos. Los otros dos casos

816 Nótese que el área empleada en el denominador de esta EUI es el área correspondiente al conjunto del parque edificado, que como confirmó el proceso de calibrado, resulta significativamente superior al área de edificios ocupados. Por tanto, las densidades de potencia presentadas en esta figura para el año 2007, en que hay una importante fracción del parque edificado que no se encuentra en uso o que no ha internalizado completamente su demanda, son inferiores a las que cabe esperar en un edificio actual que cubre toda su demanda de energía.

Figura 478. Evolución de la participación de la tecnología E3.0 en el consumo final de energía para los tres escenarios de transición considerados.

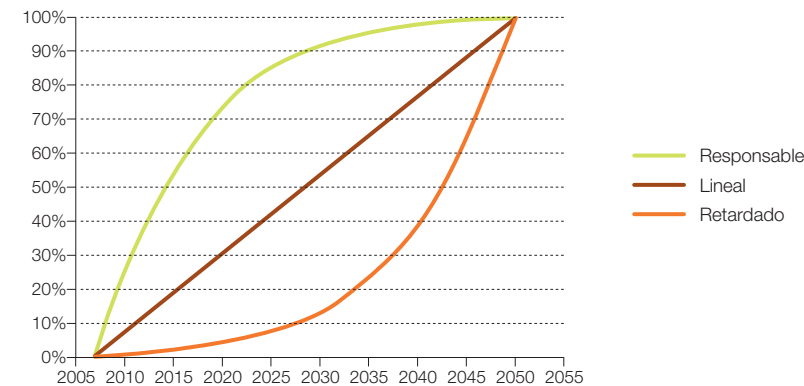
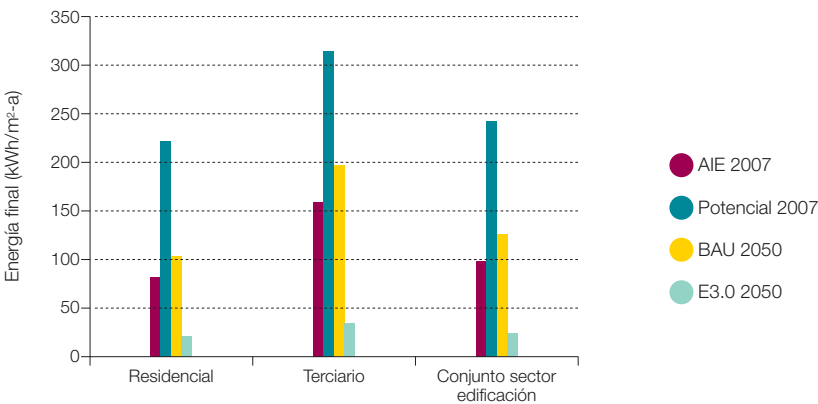


Figura 479. Valores promedio de consumo de energía final específica (en términos de área útil) para los subsectores residencial y comercial, así como para el conjunto del sector edificación, y en distintos contextos.



corresponden a los escenarios BAU y E3.0 para el año 2050. En este gráfico también obtenemos una indicación clara de los niveles de eficiencia asociados al contexto BAU (paso del “potencial 2007” al “BAU 2050”), y al contexto E3.0.

A continuación desarrollamos un escenario de evolución del consumo específico aparente de energía final en el contexto BAU

para el conjunto del sector edificación. El término “aparente” resulta del hecho de que en el numerador de este consumo específico figura el consumo real⁸¹⁷ mientras que en su denominador figura el total del área del parque edificado. En contraposición al consumo específico aparente, tenemos el consumo específico potencial, que sería el que resultaría al internalizar todos los elementos del numerador⁸¹⁸. Las hipótesis empleadas para

⁸¹⁷ Es decir, el de los edificios realmente ocupados y con el grado de internalización de los servicios energéticos que tengan realmente.

⁸¹⁸ Es decir, que toda el área del parque de edificios se encontrara en uso y que toda la demanda de servicios se encontrara internalizada.

Figura 480. Escenario de evolución del consumo específico de energía final del conjunto del parque edificatorio en el contexto BAU (aparente), comparada con la evolución del consumo específico potencial si se encontrara toda la demanda internalizada.

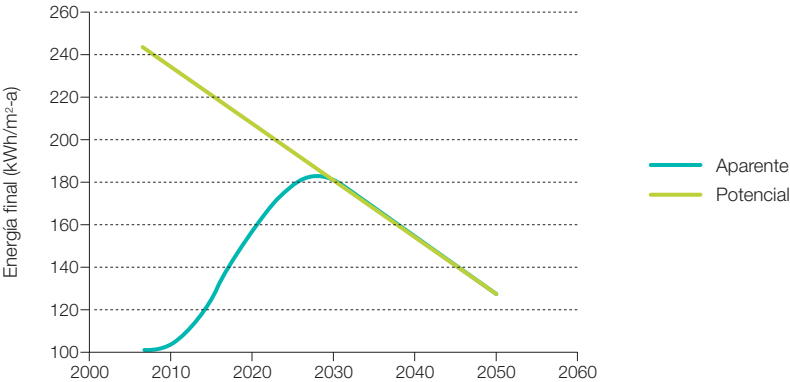
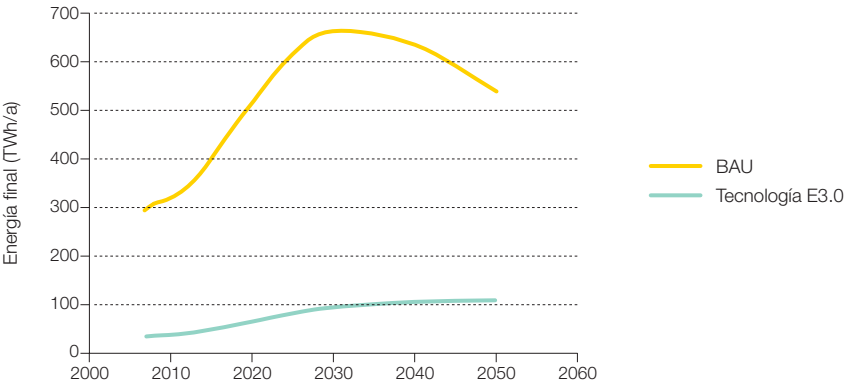


Figura 481. Escenario de evolución del consumo de energía final del conjunto del parque edificatorio en el contexto BAU, y el correspondiente a las posibilidades del contexto E3.0.



configurar este escenario de evolución del consumo específico de energía final son las siguientes:

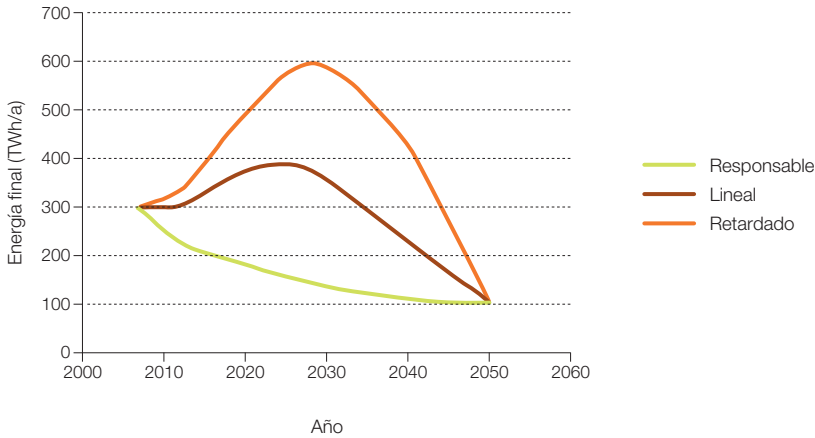
La introducción de medidas de eficiencia en el contexto BAU se realiza de forma lineal^{B19}. La internalización de la demanda de servicios energéticos y del uso del parque total edificado se desarrolla de forma no lineal, si-

guiendo la evolución que se puede observar en la figura, para completarse en el año 2030.

En estas condiciones, la figura 480 nos recoge el escenario de evolución del consumo específico aparente del sector edificación, junto a la del consumo específico potencial que refleja la introducción de medidas de eficiencia en el contexto BAU.

B19 Es de resaltar que esta hipótesis es probablemente demasiado optimista de acuerdo con la situación actual y el pasado reciente. En efecto, probablemente resultara más realista suponer un escenario retardado de introducción de las medidas de eficiencia en el contexto BAU.

Figura 482. Escenario de evolución del consumo de energía final del conjunto del parque edificatorio para los tres escenarios de transición desde el contexto BAU al E3.0 considerados.



Según estos resultados y a los escenarios de evolución de la superficie construida anteriormente presentados, podemos elaborar los escenarios de evolución del consumo de energía final en el contexto BAU, y el correspondiente a las posibilidades tecnológicas que nos ofrece el contexto E3.0, para el cual se ha considerado que el ratio de internalización de la demanda de servicios energéticos en el sector edificación es el mismo que en el BAU. La figura 481 nos recoge estos resultados.

Según estos resultados e introduciendo las distintas hipótesis de transición desde el contexto BAU al E3.0 anteriormente presentadas, obtenemos los tres escenarios de evolución de la demanda de energía final en el sector edificación en la transición desde el contexto BAU al contexto E3.0. Como podemos observar en la figura 482, en los escenarios de transición retardado y lineal, obtenemos un pico de consumo del sector edificación del orden de cuatro veces el consumo del año 2050 en torno al año 2025

para el escenario lineal de transición, y del orden de seis veces en torno al año 2030 para el escenario retardado de transición. Tan solo el escenario responsable de transición permite una evolución decreciente de la demanda del sector edificación a lo largo de todo el periodo considerado, y libera, por tanto, al sistema energético y en particular al sistema eléctrico para integrar otros componentes de consumo como el sector transporte, sin requerir un gran sobredimensionado del sistema eléctrico con sus costes e impacto ambiental asociados.

3.8 Sector industria

En este punto desarrollamos y presentamos los escenarios asociados al sector industria.

Empezamos exponiendo una serie de aspectos generales para ubicar el tratamiento que vamos a dar a este sector energético en relación al tratamiento que proporcionamos al resto de sectores.

3.8.1 Generalidades

El sector Industria presenta una serie de características diferenciales respecto a los otros dos sectores (transporte y edificación) analizados en los puntos anteriores, lo cual ha condicionado el tratamiento que le hemos dado en este informe.

En efecto, el sector industria no constituye un sector difuso como los otros dos, por lo que su seguimiento y caracterización ha sido históricamente mucho más cercano para este sector que para los sectores difusos. Esta mayor centralización ha contribuido también a que el grado de exigencias regulatorias sobre el sector industria haya sido superior al de los sectores difusos.

Por otro lado, la aplicación de medidas de eficiencia en el sector industria ha sido muy anterior a la aplicación de este tipo de medidas sobre los sectores difusos, por la vinculación directa de estas medidas con la generación de beneficio económico a gran escala. Por tanto, si bien queda un significativo margen de mejora por explotar, la evolución pasada del consumo energético de este sector ya muestra una contención significativa del crecimiento de la demanda sectorial, incluso a pesar de constituir el sector industria uno de los motores principales del crecimiento mantenido del PIB que hemos tenido en el pasado.

Incluso desde el punto de vista de la gestión de la demanda, el sector industria es el único que actualmente ya tiene la posibilidad de participar activamente en este campo mediante los contratos de servicio de gestión de la demanda de interrumpibilidad⁸²⁰.

De cara al desarrollo futuro de la estructura de nuestro sistema energético, el sector industria

que en términos de energía final ya es en la actualidad menos importante que los sectores transporte y edificación, cabe esperar que la importancia relativa del sector industria frente a los otros dos sectores en un contexto BAU vaya haciéndose cada vez menor debido, por un lado, a las acentuadas tendencias de crecimiento del consumo energético en los sectores difusos y por otro a la contención de dicho consumo en el sector industria. Sin embargo, en un contexto E3.0, precisamente ese menor margen de mejora en el sector industria puede hacer que acabe siendo uno de los sectores más importantes en la estructura de la demanda energética.

Por otro lado, la gran diversidad de casuísticas dentro del sector industria requeriría un análisis específico fuera del alcance de este estudio, para cuantificar con detalle los potenciales de mejora, pero proporcionado un potencial de reducción del consumo menor que en los sectores difusos.

Por tanto, la caracterización actual del sector industria, e incluso el potencial desarrollo de su escenario BAU, contiene mucha menos incertidumbre e incógnitas de las que enfrentamos en los sectores difusos. Por este motivo, hemos decidido invertir la mayor parte del recurso asociado al desarrollo de este informe en profundizar en la caracterización y elaboración de escenarios para los sectores difusos que encerraban la mayor parte de incógnitas sobre su desarrollo y su potencial tanto en los contextos BAU como E3.0.

Sin embargo, en el sector industria sí que hay un elemento de distorsión a menudo no considerado y que puede tener un efecto relevante. Se trata de la tendencia a desplazar la actividad industrial hacia terceros países, redirigiendo la actividad económica hacia la prestación de servicios, e importando una cantidad

⁸²⁰ Regulada por la Orden ITC/2370/2007 con entrada en vigor el 1 de julio de 2008.

creciente de productos industrializados en terceros países. La energía almacenada⁸²¹ en estos productos importados, más allá de la correspondiente al proceso de transporte⁸²² desde el país de manufactura al país de destino, significa una contribución importante al consumo energético en el país receptor que se traslada por completo al balance energético del país productor de esos bienes de consumo.

Esta situación se produce también en términos de balances de emisiones, en que los denominados países desarrollados externalizan emisiones hacia economías emergentes, que por la deslocalización de la industria pasan a convertirse en las fábricas del mundo. En (MacKay, J. C. D., 2008) se presenta una contabilización de este efecto para el caso del Reino Unido, donde las emisiones per cápita oficiales son del orden de 11 tCO₂-eq/hab-a, y al contabilizar el efecto de todos los bienes de consumo importados pasan a ser de 21 tCO₂-eq/hab-a, es decir, experimentan un incremento del 91%, prácticamente doblándose.

En este estudio no hemos intentado abarcar este efecto de las importaciones de bienes de consumo sobre el balance energético, por lo que las contribuciones y escenarios sobre el sector industria se corresponden exclusivamente al consumo del sector industria dentro del país. Pero consideramos que sería importante extender el análisis para incorporar este efecto, y obtener así una visión más realista de la huella energética de nuestro país, lo que permitiría enmarcar mejor el alcance de las actuaciones planteadas.

Por otro lado, tecnologías como la solar térmica y la cogeneración, que en otros sectores no se perfilaban como las mejores opciones tecnológicas desde la perspectiva de la integración del sistema energético, en el

sector industria aparecen como tecnologías apropiadas para limitar el consumo de biomasa en este sector y, por tanto, hemos recurrido a ellas para configurar el contexto E3.0, junto a otras tecnologías como las bombas de calor, todas ellas actuando con posterioridad a desplegar las medidas de eficiencia disponibles. En conjunto, el potencial de reducción de la demanda de energía final que cabe esperar en este sector, sin llegar a alcanzar la magnitud de los sectores difusos, es importante, y como veremos necesaria para acotar los requerimientos de biomasa dentro del alcance de los recursos disponibles.

3.8.2 Situación actual y estructura energética

Por lo que respecta a la estructura energética actual del sector industrial en España, la figura 483 nos muestra la participación de las distintas fuentes energéticas a la cobertura de la demanda final de energía del sector, según el balance de la AIE para el año 2007.

Pero más allá de la estructura de la demanda en términos de la energía final actualmente empleada, nos interesa conocer la estructura de la demanda en términos de servicios energéticos solicitados, pues la modificación de las tecnologías a emplear para la cobertura de estos servicios puede afectar significativamente a la estructura de la demanda en términos de energía final. Separando los servicios energéticos entre aquellos que requieren electricidad y los que requieren energía térmica (calor), considerando un rendimiento medio de la generación de calor a partir de combustibles fósiles del 75% como representativo de la situación en el año 2007, e incluyendo dentro de la demanda de calor la correspondiente a las pérdidas térmicas asociadas a la distribución de

⁸²¹ Embodied Energy.

⁸²² Que a menudo tampoco se contabiliza en el balance energético del país receptor.

Figura 483. Participación de distintos recursos energéticos a la cobertura de la demanda final del sector industrial en España el año 2007 según el balance de la AIE.

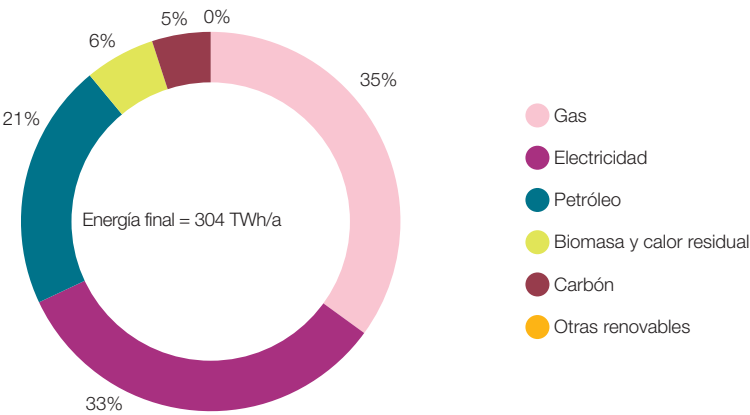
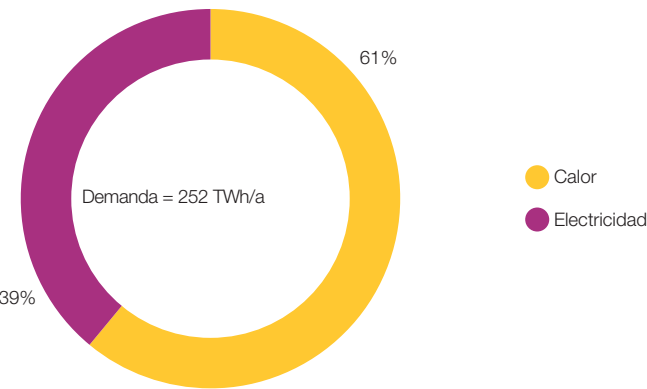


Figura 484. Estructura de la demanda energética del sector industria en términos de demanda de calor y de electricidad. Elaborado a partir de los datos del balance de la AIE para el año 2007. Considerando un rendimiento medio del 75% para la generación de calor, e incluyendo las pérdidas térmicas por distribución de calor dentro de la demanda de calor.



esta energía térmica⁸²³, en la figura 484 podemos observar la estructura de la demanda de servicios energéticos en términos de calor y electricidad, pudiendo comprobar que la demanda de este sector está actualmente dominada por los requerimientos de calor respecto a los de electricidad.

Desde el punto de vista de la consideración de tecnologías para cubrir la demanda de este sector, tiene relevancia el conocer la estructura por niveles de temperatura de la demanda de calor en el sector industrial. En efecto, tecnologías como la solar térmica y las bombas de calor ven limitadas sus prestaciones con el

823 Las pérdidas asociadas a la distribución de energía térmica pueden ser importantes, especialmente si se emplea vapor para la distribución, y realmente no constituyen una componente directamente ligada a la demanda del servicio energético, sino más bien a la elección de la tecnología para cubrirlo. En un contexto E3.0 parte de estas pérdidas se podrían eliminar al sustituir la distribución térmica por una distribución eléctrica.

nivel térmico de la demanda a cubrir. En la figura 485 reproducimos esta estructura tomando como válida la presentada en (IDAE, 2001)⁸²⁴. La clasificación de los distintos rangos de temperatura es la siguiente:

Baja:	< 60 °C
Media:	60 °C-150 °C
Media-alta:	150 °C-250 °C
Alta:	>250 °C

Figura 485. Distribución de la demanda de calor por rangos de temperatura. El total de la demanda es el correspondiente al balance de la AIE para el año 2007, y el reparto modal el que se deduce de (IDAE, 2001).

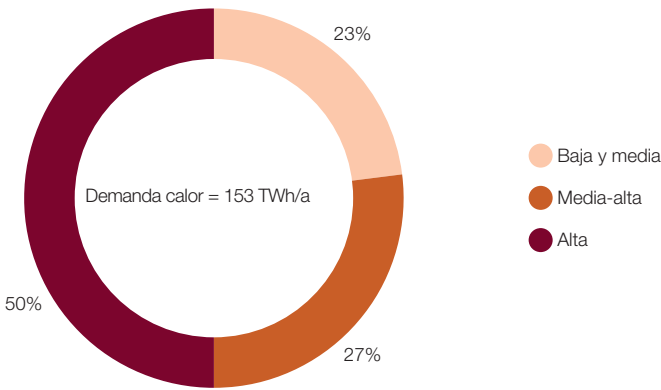
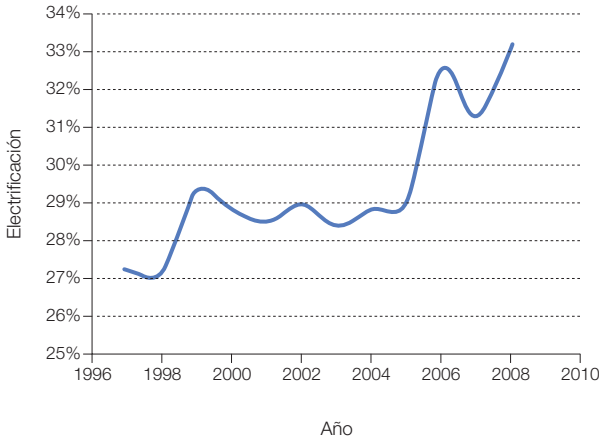


Figura 486. Evolución del consumo energético per cápita del sector industrial en España y distintos países del entorno (datos Eurostat).



824 Esta referencia constituye la última oficial destinada a analizar la estructura del sector industrial desde la perspectiva de integración de energía solar térmica. Nos consta que recientemente se ha elaborado otro estudio encargado por el IDAE con vistas a la preparación del nuevo PER, pero sus resultados no estaban disponibles al redactar este informe (10/2010).

Figura 487. Evolución histórica de la electrificación del sector industrial en España. Datos Eurostat.



Por lo que respecta a la evolución histórica y su comparativa con otros países del entorno, la figura 486 nos presenta la evolución del consumo energético per cápita del sector industrial en España y algunos países del entorno según datos Eurostat. En esta figura observamos, por un lado, la tendencia decreciente del consumo energético per cápita de este sector, debida a la incorporación de medidas de eficiencia, y a la desindustrialización de las economías, lo que desplaza el consumo energético para producción de bienes de consumo industriales hacia otros países⁸²⁵. La tendencia en España ha sido contraria, con un gran crecimiento hasta el año 2005, situándose con valores incluso superiores a los de Alemania, pero experimentando a partir de 2005 un gran decrecimiento para colocarse en el orden de magnitud de los otros países considerados. Desde la perspectiva de estos resultados, parece difícil plantearse incluso como escenario BAU para España, una tendencia creciente en el consumo del sector industrial tal y como hacen las referencias oficiales como la E4.

Otro elemento relevante de la estructura energética del sector industrial es su creciente electrificación tal y como recoge la figura 487.

3.8.3 Otros escenarios

La única referencia oficial por lo que respecta a escenarios de evolución del consumo de energía en el sector industria en nuestro país la constituye las E4⁸²⁶, tanto en sus documentos sectoriales del año 2003, como en el plan de acción 2008-2012 del año 2007⁸²⁷. La figura 488 nos recoge el escenario base y eficiente desarrollado en estas referencias para el sector industria que, como vemos, apunta a un crecimiento mantenido⁸²⁸ del consumo de energía en este sector en contra de las tendencias que apuntábamos en el punto anterior⁸²⁹. Por lo que respecta al reparto subsectorial, en (IDAE, 2007) figura la evolución histórica que recogemos en la figura 489.

Otra referencia en la que se desarrolla un escenario de consumo energético para el año

⁸²⁵ E importando posteriormente los productos manufacturados junto a su *embodied energy*.

⁸²⁶ Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012 (IDAE, 2001).

⁸²⁷ Es de destacar el hecho de que el sector industria es el único sector para el que el plan de acción 2008-2012 no introduce requerimientos de eficiencia adicionales (E4+).

⁸²⁸ Del 3%/a para el escenario base y reduciéndose hasta el 2,2%/a para el escenario eficiente.

⁸²⁹ A este respecto resulta ilustrativo el hecho de que ya en 2007 el plan de acción tuvo que corregir a la baja el escenario base de la E4 por el menor consumo energético observado en el año 2005 respecto al del escenario base elaborado en la E4 (IDAE, 2003).

Figura 488. Escenario base corregido y eficiente de la E4 para el consumo de energía final en el sector industria según el plan de acción 2008-2012 (IDAE, 2007).

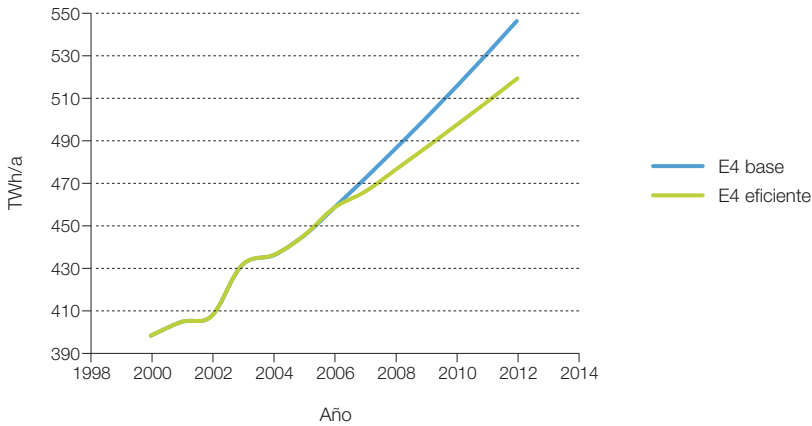
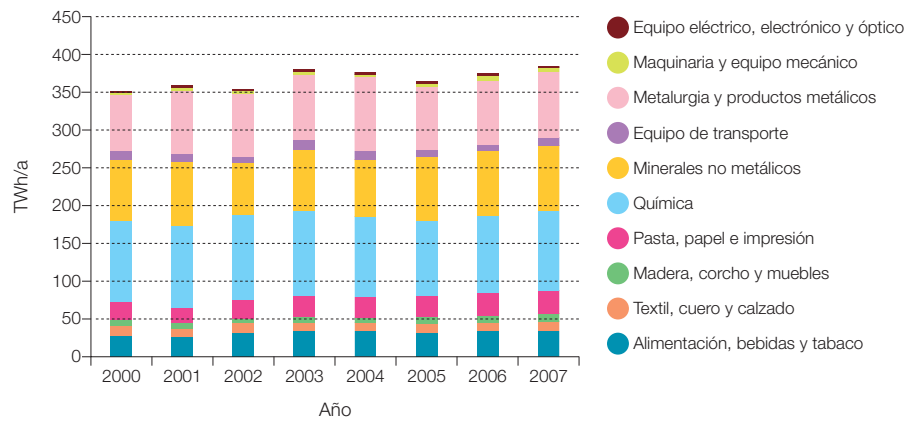


Figura 489. Evolución de la estructura subsectorial del consumo de energía final en el sector industria. Datos (IDAE, 2007).



2050 en EE. UU. (Arjun Makhijani, 2008). El sector Industria, apoyándose en el hecho de que el consumo energético ha permanecido más o menos constante durante las últimas tres décadas, incluso sin la existencia de costes del CO₂ y grandes fluctuaciones en los precios de la energía, predice una evolución común a los escenarios BAU y eficiente con

una reducción constante del -1%/a en el consumo de energía final de este sector.

Otro componente relevante desde el punto de vista de la elaboración de escenarios en el sector industrial es la consideración del episodio de crisis que se inició en el año 2008. En la figura 490, elaborada a partir de los

Figura 490. Evolución del consumo de energía final per cápita en el sector industria para el escenario de referencia y el eficiente ([R]E) en OCDE-Europa según (GP, 2010).

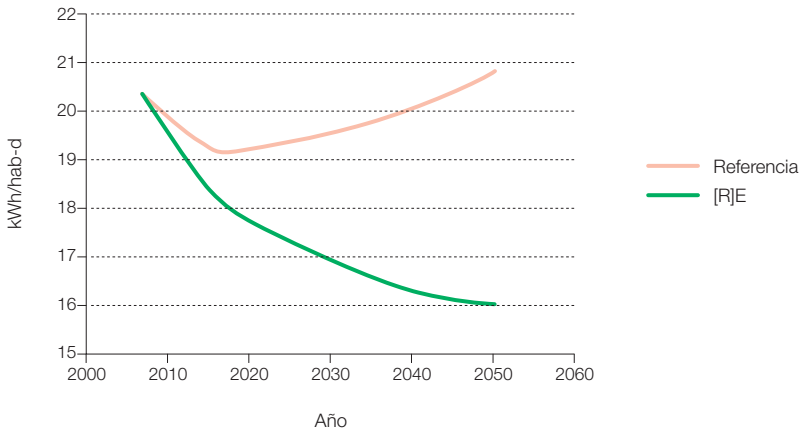
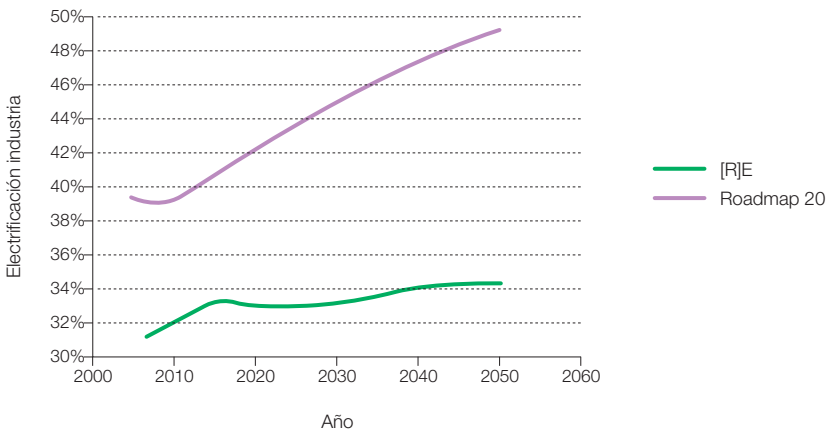


Figura 491. Escenarios de electrificación en el sector industria según (GP, 2010) para OCDE-Europa y ECF, 2010) para Europa.



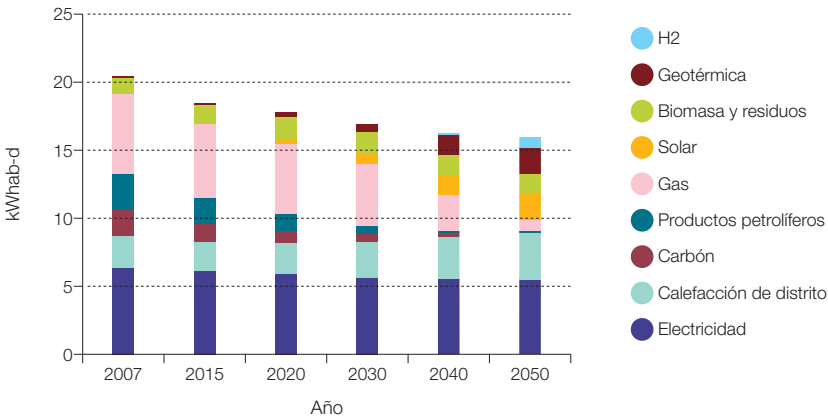
datos presentados en el informe [R]E (GP, 2010), vemos cómo se refleja el efecto de la crisis en la evolución del consumo energético per cápita del sector industrial para OCDE Europa. En el escenario de referencia⁸³⁰ la depresión se prolonga hasta pasado el año 2015, mientras que en el escenario eficiente, ya no se recuperan las tasas

crecientes en el consumo de energía al iniciar el despliegue de las medidas de eficiencia en el periodo de crisis.

Por lo que respecta a los escenarios de electrificación en el sector industria, la figura 491 nos presenta los resultados de los escenarios desarrollados en (GP, 2010) y (ECF,

⁸³⁰ Este escenario de referencia coincide con el de la AIE hasta el año 2030.

Figura 492. Evolución de la estructura de la cobertura de la demanda para el sector industria en el escenario más eficiente de (GP, 2010) para OCDE-Europa.



2010). Como podemos observar, las tasas de electrificación son considerablemente distintas, pero en ambos casos se pronostica una tendencia creciente.

En (GP, 2010) se muestra también el reparto entre las distintas fuentes energéticas para cubrir la demanda de energía final en el sector industria. La figura 492 recoge los resultados correspondientes al escenario más eficiente para OCDE-Europa. Para el año 2050 resulta interesante observar la participación de la geotérmica, el hidrógeno y la calefacción de distrito (DH)⁸³¹, que a su vez está abastecido por energía solar, biomasa y geotérmica. En el caso del escenario E3.0 que nosotros presentaremos aquí, la geotérmica no se ha empleado para el sector industrial dado el recurso relativamente limitado que se desprende en (GP, 2005), y los sistemas DH, que a diferencia de otros países europeos cuentan en España con un bajo despliegue, tampoco se han considerado⁸³² en el contexto E3.0 por constituir un enfoque centralizado⁸³³ que duplica⁸³⁴, en gran medida, la infraestructura existente de la red eléctrica para el caso del sistema ener-

gético integrado, y resulta difícilmente justificable en estas condiciones la inversión asociada a la infraestructura adicional. Por lo que respecta al uso del hidrógeno, la mayor eficiencia energética que hemos considerado para el contexto E3.0 nos ha conducido a eliminar la participación de este vector energético en el sector industrial por sus penalizaciones energéticas. Por lo que respecta a la biomasa, su aplicación en el contexto E3.0 ha sido tanto mediante procesos cogenerativos vía gasificación, como mediante procesos de combustión directa para cubrir la demanda de alta temperatura sin disparar⁸³⁵ los requerimientos de biomasa necesaria.

⁸³¹ DH: District Heating.
⁸³² La situación es distinta en países donde la infraestructura del DH ya se encuentra desplegada y por tanto, aunque en un contexto E3.0 con el sistema energético integrado suponga una duplicación de la infraestructura, la opción más eficiente es aprovecharla para la integración de renovables térmicas.
⁸³³ Es más, con la dispersión del parque industrial en España la aplicación del DH se encuentra más limitada que en otros países donde las redes de DH han surgido para integrar el calor residual de instalaciones de cogeneración situadas a poca distancia de los puntos de consumo.
⁸³⁴ En un contexto E3.0 con un sistema energético integrado y un sistema eléctrico inteligente, siempre resulta más eficiente y económico transportar la energía en forma eléctrica que en forma térmica hasta el punto de consumo.
⁸³⁵ La cogeneración permite producir simultáneamente electricidad y calor, pero requiere de una mayor cantidad de biomasa para cubrir una demanda térmica dada, motivo por el cual resulta menos interesante al disponer de otras formas de cubrir la demanda térmica vía generación eléctrica con fuentes renovables. Por este motivo hemos limitado la participación de la cogeneración a ciertas aplicaciones de temperatura media.

3.8.4 Elementos para el contexto E3.0

En este apartado completamos la información proporcionada en los puntos anteriores sobre la configuración del contexto E3.0 para el sector industria.

3.8.4.1 Consideraciones generales sobre el nivel de eficiencia

Un primer elemento diferencial a tener en cuenta es que, como ya comentamos anteriormente, el sector industria lleva ya una importante trayectoria de incorporación de medidas de eficiencia en sus procesos, motivo por el que a priori no cabe esperar grandes reducciones en la demanda energética del sector.

En (Energy Efficiency Watch, 2009) se recogen los resultados de la evaluación del potencial de ahorro sectorial a nivel de la UE-27 según se desprende del análisis de los planes de acción de eficiencia energética a nivel nacional. La figura 493 nos recoge estos resul-

tados, y en ellos podemos apreciar cómo el sector industria es el que proporciona un menor potencial de ahorro por introducción de medidas de eficiencia. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, por ejemplo para España, la fuente de estos datos son los resultados de la E4, que como vimos anteriormente apuntaban a un ahorro limitado en este sector.

En (Fundación Entorno, 2009) se recoge la situación de los distintos sectores de la industria española en lo que respecta a los niveles de eficiencia de sus procesos, mostrando que los niveles de eficiencia actualmente desplegados en muchos subsectores industriales ya son muy elevados y comparables o mejores que los de los países de nuestro entorno económico.

Sin embargo, tal y como nos indica (McKinsey Company, 2009) todavía es posible explotar un significativo potencial de incremento de eficiencia en los procesos industriales. En efecto, la figura 494 nos muestra el reparto

Figura 493. Evaluación del potencial de ahorro en la UE-27 según se desprende de los planes de acción en eficiencia energética nacionales. Datos de (Energy Efficiency Watch, 2009).

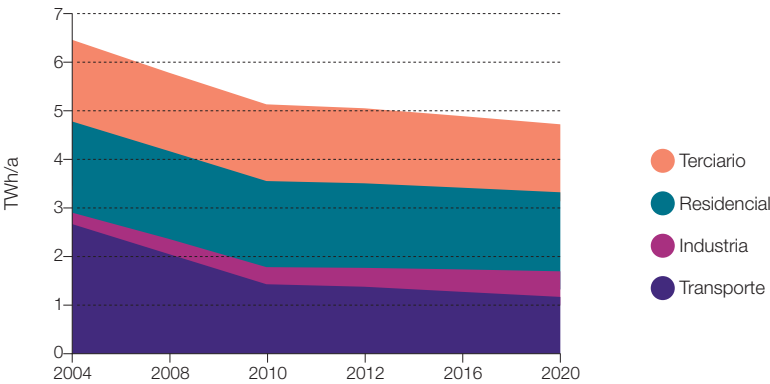
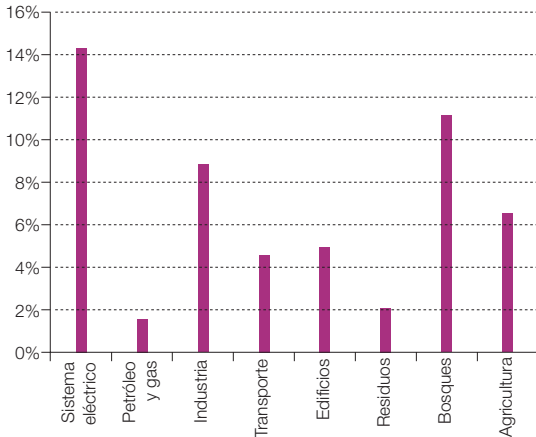


Figura 494. Contribución sectorial al potencial global de reducción de emisiones de GEI. Datos (McKinsey Company, 2009).



sectorial del potencial de reducción de emisiones de GEI a nivel global, mostrando que el sector industrial en su conjunto dispone de un potencial importante.

Si a este potencial de eficiencia le añadimos otros elementos como la electrificación con bombas de calor y la contribución de la solar térmica para la cobertura de la demanda térmica, la cogeneración con biomasa, la aplicación de procesos inteligentes y la desmaterialización, al final podemos ver que en el sector industria tenemos un importante potencial de reducción de consumo. En los siguientes puntos profundizamos un poco más sobre algunos de estos elementos incorporados en el contexto E3.0.

3.8.4.2 Motores y procesos industriales inteligentes

Los procesos industriales son, por lo general, procesos complejos en los que interactúan o coexisten distintos flujos energéticos en condiciones variables a lo largo del tiempo.

La integración de procesos para potenciar las sinergias entre distintos procesos aconteciendo simultáneamente, fundamentalmente mediante la maximización de la recuperación térmica entre procesos y el acoplamiento adecuado entre sus niveles térmicos para evitar degradaciones energéticas, puede proporcionar todavía un potencial significativo de mejora en las industrias españolas.

Los motores eléctricos constituyen un componente muy importante en la demanda de energía eléctrica dentro de la industria. Tal como se indica en (The Climate Group, 2008), la aplicación de inteligencia a la operación de estos motores proporciona un importante potencial de reducción del consumo, al igual que la aplicación de inteligencia a la logística de los procesos industriales.

3.8.4.3 Electrificación de la demanda térmica

La electrificación de la demanda térmica proporciona un potencial de eficiencia que va

más allá de las mejoras de rendimiento por cambio del proceso que aparecen en algunos sectores industriales⁸³⁶ debido fundamentalmente a dos elementos: las bombas de calor y la reducción de las pérdidas de distribución.

Por lo que respecta a las pérdidas en distribución la ventaja de la electrificación estriba en poder transportar la energía en forma eléctrica hasta el punto final en el que se solicita la demanda térmica, en lugar del proceso tradicional en el que la generación térmica centralizada se distribuye mediante tuberías, a menudo en forma de vapor, hasta los distintos puntos dentro de la industria en los que se solicita la demanda térmica, incurriendo en unas pérdidas por distribución considerablemente superiores, consecuencia tanto de las propias pérdidas térmicas durante el transporte del fluido caliente por las tuberías, como por las fugas de vapor, los condensados, y los diferentes saltos térmicos en los distintos puntos de demanda. En (HPTCJ, 2009) llegan a cifrar el conjunto de estas pérdidas térmicas asociadas al transporte en forma de vapor en un 48% del aporte de combustible, a lo que se debe añadir el rendimiento de la caldera. La electricidad permite un transporte mucho más eficiente de esta energía hasta los puntos de consumo, para luego convertir esa electricidad en energía térmica con un rendimiento que puede oscilar entre el 100% para un proceso resistivo, hasta valores del orden del 800% al emplear bombas de calor en procesos recuperativos.

Además, en el contexto E3.0 de un sistema energético integrado operando al 100% con energías renovables, esta electrificación de la demanda térmica permite aprovechar electricidad “residual” procedente de los requerimientos de regulación del sistema de generación eléctrica para ajustar la generación a la demanda.

Por último, la electrificación de la demanda térmica del sector industrial permite que dicho sector tenga un mayor potencial de participación en la gestión de la demanda, y por tanto en la regulación del sistema de generación.

3.8.4.4 Bombas de calor

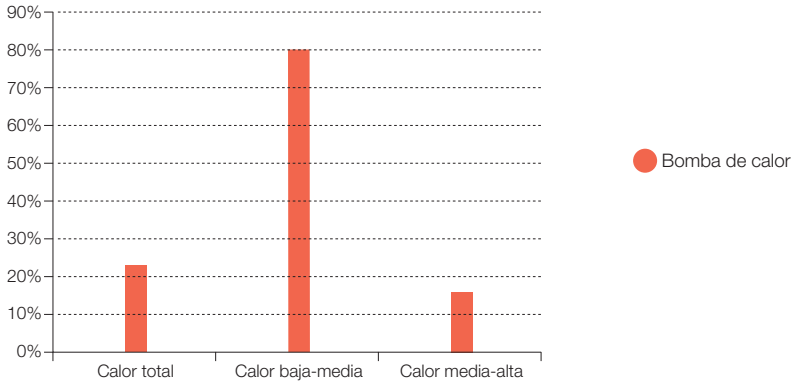
En un contexto de un sistema energético integrado alimentado por un sistema eléctrico alimentado con energías renovables, las bombas de calor constituyen una tecnología muy apropiada en distintos sectores energéticos. En el sector edificación ya vimos el papel que pueden llegar a jugar. Pero en el sector industrial se abren muchas aplicaciones importantes para las bombas de calor (HPTCJ, 2009), acotadas tan solo por los niveles del salto térmico requerido por la aplicación, pues el COP de las bombas de calor cae rápidamente con este salto térmico.

De entre las distintas aplicaciones en las que puede considerarse la bomba de calor en el sector industrial destacan, por su elevado rendimiento, las aplicaciones recuperativas en las que la bomba de calor se emplea para generar energía térmica a partir de un efluente de calor residual, o incluso para proporcionar simultáneamente dos efectos útiles al enfriar un fluido con la energía necesaria para calefactar otro a mayor nivel térmico.

En el contexto E3.0 del sector industrial hemos empleado extensamente las bombas de calor para cubrir un total del orden del 24% de la demanda térmica en este sector, distribuido a través de un 81% de la demanda de baja- media temperatura y un 16% de la demanda de media-alta temperatura.

⁸³⁶ Como la migración en la industria del hierro-acero del proceso BF/BOF al proceso EAF de arco eléctrico.

Figura 495. Contribución de las bombas de calor a la cobertura de la demanda térmica del sector industria en el contexto E3.0.



3.8.4.5 Aportes renovables autónomos

En el sector industria, más allá del aporte renovable local de energía térmica ambiente que proporcionan las bombas de calor, hemos recurrido también a los aportes renovables térmicos autónomos que proporcionan la biomasa y la solar térmica. A diferencia de lo que sucedía en otros sectores como la edificación, la gran variedad de aportes de niveles térmicos en el sector industria, y la imposibilidad de acceder a todos ellos con bombas de calor, junto con los elevados niveles de eficiencia alcanzados en los otros sectores, que conducen a un menor requerimiento de potencia instalada en el sistema de generación eléctrica, y por tanto a una menor disponibilidad de electricidad “residual” procedente del proceso de regulación, han hecho que consideráramos adecuado incluir aportes térmicos renovables autónomos.

Dada la escasez del recurso de biomasa y la necesidad de apoyarse en ella en otros sectores⁸³⁷, hemos optado, por un lado, por apurar las posibilidades de la solar térmica, y por otro lado por limitar las aplicaciones de

cogeneración que conducen a un mayor requerimiento⁸³⁸ de biomasa para una demanda térmica dada.

3.8.4.6 Biomasa

En el sector industria, la biomasa se ha empleado tanto para alimentar a aplicaciones de cogeneración, vía gasificación de la biomasa, que por un lado proporcionan una cobertura parcial de la demanda eléctrica del sector y por otro lado apoyan en la cobertura de la demanda térmica, como para aplicaciones por combustión directa en el rango de mayor temperatura de la demanda de calor. La ventaja de las aplicaciones por combustión directa es que requieren menos de la mitad de biomasa para cubrir la misma demanda térmica, y además, en las aplicaciones térmicas de alta temperatura queda muy poco o ningún margen para la generación eléctrica. Por estos motivos hemos combinado ambas aplicaciones de la biomasa.

Para las aplicaciones de cogeneración, hemos considerado cogeneraciones con biomasa gasificada, con un rendimiento de

⁸³⁷ Transporte y usos no energéticos, además de su papel como reguladora del sistema eléctrico mediante la hibridación termosolar.

⁸³⁸ Aunque como contrapartida proporcionan una generación local de electricidad. Pero dado que el potencial de otras fuentes renovables es en España muy superior al de la biomasa (GP, 2005), no parece apropiado hacer que el sistema de generación eléctrica se apoye demasiado en la biomasa más allá de su contribución para la regulación articulando la potencia rodante de las centrales termosolares.

gasificación del orden del 80%, un rendimiento total de la cogeneración del 95%, y relaciones electricidad / calor que se reducen con el nivel térmico de la demanda a cubrir.

Para las aplicaciones de combustión directa de la biomasa hemos considerado un rendimiento del 95%.

Por lo que respecta a la cobertura de la demanda térmica total del sector industria, la cogeneración con biomasa contribuye en un 23%, repartida entre un 28% de la cobertura del calor de media-alta y un 30% del calor de alta, mientras que la combustión directa de la biomasa en un 12% de la demanda total térmica, localizada en un 25% de cobertura de la demanda de calor de alta temperatura. La figura 496 recoge estos resultados.

3.8.4.7 Solar térmica

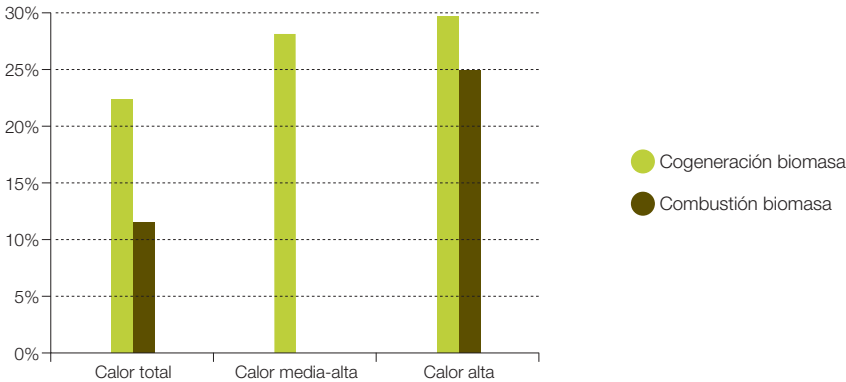
La energía solar térmica tiene capacidad de cubrir localmente parte de la demanda de calor en diversas aplicaciones industriales.

En el sector edificación veíamos que la solar térmica resultaba parcialmente⁸³⁹ desplazada por la aplicación de las bombas de calor, que permitían una integración más eficiente con el conjunto del sistema energético.

Sin embargo, en el sector industria los niveles térmicos accesibles a las bombas de calor constituyen tan solo una fracción del total de la demanda térmica, mientras que la solar térmica dispone de tecnologías para acceder prácticamente a todos los niveles térmicos.

Por tanto, en los niveles térmicos no accesibles a las bombas de calor, la solar térmica se encuentra tan solo con la competencia del uso por efecto Joule⁸⁴⁰ de la electricidad residual asociada a la regulación del sistema eléctrico, que si bien sigue resultando prioritaria a la solar térmica por sus menores costes, pero debido a su COP = 1 tiene capacidad de cubrir una menor fracción de la demanda. Si a esto le añadimos que el nivel de eficiencia alcanzado en los demás sectores conducen a una demanda de electricidad considerablemente inferior a lo que exigiría un contexto

Figura 496. Participación de la cogeneración con biomasa y la combustión directa de la biomasa en la cobertura de la demanda térmica del sector industria en el contexto E3.0.



839 Básicamente, la solar térmica seguía presente en el contexto E3.0 por el impulso que es previsible que reciba durante el proceso de transición debido a su implementación en el contexto BAU.

840 Resistivo.

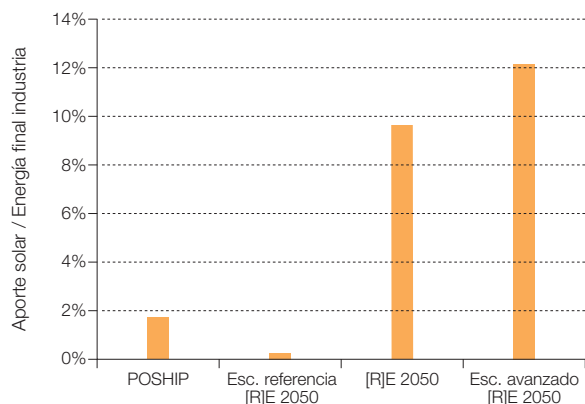
BAU en demanda, llegamos a la conclusión que más allá del aprovechamiento de esta electricidad residual, el sector industria requerirá de aportes energéticos adicionales para dar cobertura completa a su demanda de calor. Y en un contexto E3.0 estos aportes adicionales, excluyendo la solar térmica, tan solo pueden venir de la biomasa o de la generación de hidrógeno vía electricidad renovable. Puesto que por un lado el recurso de biomasa es limitado⁸⁴¹, y por otro lado la introducción del vector hidrógeno conduce a una significativa penalización energética sobre el sistema, la energía solar térmica en el sector industrial surge como una opción tecnológica apropiada para reducir los requerimientos de biomasa e hidrógeno.

En España, el estudio (IDAE, 2001) constituye la referencia oficial más reciente⁸⁴² relativa al potencial de la energía solar térmica en el sector industrial. Por otro lado, los escenarios para el año 2050 desarrollados en el marco del informe Energy [R]evolution de GP, también contemplan la participación de esta tecnología

para la cobertura de parte de la demanda térmica del sector industria. Tal y como podemos observar en la figura 497 la participación relativa de la solar térmica en los escenarios eficientes del [R]E para el conjunto de la OCDE-Europa son considerablemente superiores a los potenciales recogidos en el estudio POSHIP, a pesar de contar en España con un recurso solar significativamente mejor que la media de los países de OCDE-Europa.

Por rangos de temperatura, en la región de baja-media temperatura, la solar térmica se encuentra con las bombas de calor, que operando con COP muy elevados⁸⁴³ constituyen una opción tecnológica muy eficiente e integrada con el conjunto del sistema energético. Sin embargo, las opciones de las bombas de calor se ven muy reducidas⁸⁴⁴ en el rango de la media-alta temperatura, y son nulas en el rango de la alta temperatura. Es en estos dos rangos de temperatura más elevada donde la solar térmica constituye la única opción para acotar las participaciones de la biomasa y/o del hidrógeno, una vez

Figura 497. Comparación de la participación de la energía solar térmica en la cobertura de la demanda del sector industrial según el proyecto POSHIP (IDAE, 2001), y los distintos escenarios desarrollados en (GP, 2010) para OCDE-Europa.



⁸⁴¹ Como veremos más adelante, al considerar el conjunto de los sectores, la demanda de biomasa, incluso bajo el contexto E3.0, se puede acercar mucho al total del recurso disponible.

⁸⁴² Existe un estudio encargado por el IDAE del año 2009 de cara a la elaboración del nuevo PER, pero en el momento de redactar este informe (10/2010) sus resultados todavía no estaban disponibles.

⁸⁴³ La aplicación en procesos recuperativos permite incrementar todavía más el COP al aproximar los niveles térmicos de los focos caliente y frío.

⁸⁴⁴ Limitándose a algunos procesos recuperativos.

agotadas las posibilidades del uso de la electricidad residual.

Para el desarrollo del contexto E3.0 hemos considerado la participación de la solar térmica para cubrir un 19% de la demanda de calor de baja-media temperatura, un 39% de la demanda de calor de media-alta temperatura y un 10% de la demanda de calor de alta. En conjunto el aporte de la solar térmica en el contexto E3.0 cubre un 21% de la demanda total de calor y un 10% de la demanda total de calor y electricidad en este sector, y es, por tanto, del orden de magnitud de lo contemplado en los escenarios [R]E para el conjunto de OCDE-Europa. La figura 498 recoge las contribuciones de la solar térmica autónoma a la cobertura de la demanda térmica del sector industria en el contexto E3.0.

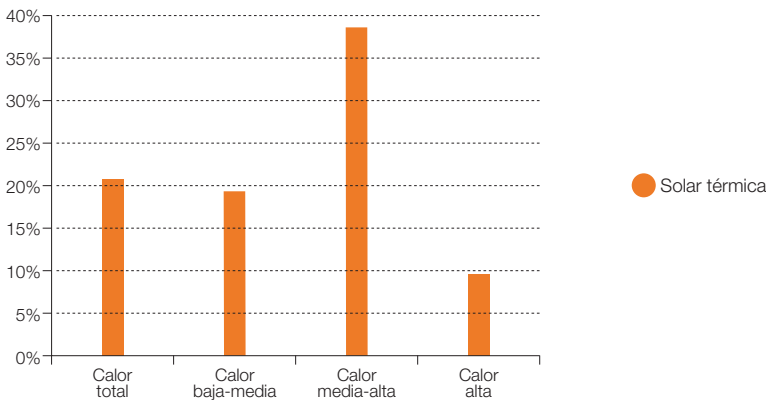
3.8.4.8 Desmaterialización

La desmaterialización de la economía puede aportar una reducción significativa de consumo en el sector industrial por la reducción

de necesidades de fabricación de productos con soporte material. En (The Climate Group, 2008) se cuantifican estos efectos en lo que se refiere a la disminución de la producción de CDs, DVDs y papel al sustituirlos por la distribución *on-line*.

De igual forma, algunos de los planteamientos realizados en el contexto E3.0, contribuyen a reducir la demanda de productos materiales, evolucionado la economía de la situación actual en que se encuentra, basada en la venta de productos⁸⁴⁵, a un sistema económico inteligente basado en la venta de servicios y alineado por tanto con los requerimientos de eficiencia. En este sentido, el despliegue del sistema de transporte inteligente que apuntábamos para el contexto E3.0 conduce a una reducción muy importante de los requerimientos de producción de vehículos, lo que puede conducir a una significativa reducción de la demanda de energía en el sector industrial. Incluso más allá de las interacciones directas del planteamiento E3.0 en otros sectores, los cambios de actitud de la sociedad respecto a las implicaciones energéticas de sus

Figura 498. Participación de la solar térmica autónoma en la cobertura de la demanda térmica del sector industria para el contexto E3.0.

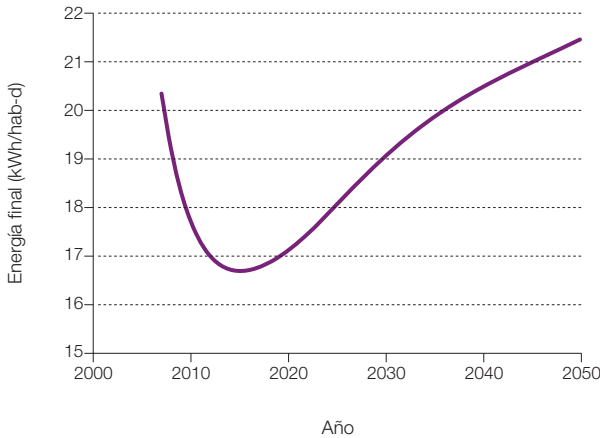


845 Lo que requiere, por tanto, un consumo muy elevado para poder mantener la "salud" del sistema económico, aunque sea a costa de la salud del planeta.

decisiones, también tiene un importante potencial de reducción del consumo de energía en todos los sectores.

En el desarrollo del contexto E3.0 no hemos incorporado la mayoría del potencial de estos elementos de desmaterialización sobre la elaboración de los escenarios correspondientes.

Figura 499. Escenario BAU de energía final per cápita para el sector industria.



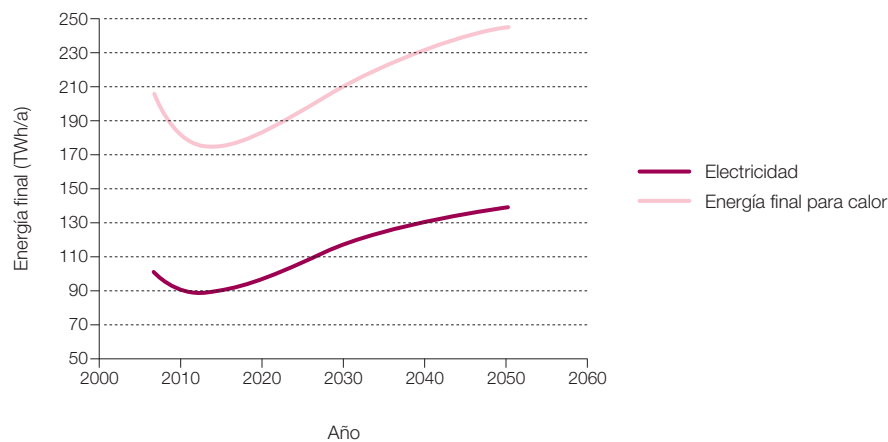
3.8.5 Escenario BAU

Para la elaboración del escenario BAU hemos partido de la situación inicial reflejada por los valores de consumo energético en el sector industria del balance de la AIE en el año 2007, actualizándolo al 2008 con el dato disponible de Eurostat. Es destacable, que tal y como hemos apuntado anteriormente, la evolución del sector industrial en estos últimos años se aleja significativamente de las elevadas tasas de crecimiento constante de los escenarios de la E4. Por el contrario, en el desarrollo del escenario BAU hemos recogido el retroceso ocasionado por la crisis en el crecimiento de la demanda de energía en el sector industrial,

en línea con los escenarios de la AIE en el WEO. Posteriormente a la depresión el BAU de industria vuelve a recuperar un cierto crecimiento del consumo de energía⁸⁴⁶ en línea con el escenario de referencia de (GP, 2010) para OCDE-Europa. Así mismo desarrollamos un escenario de electrificación BAU del sector industrial, con una tendencia creciente a la electrificación apoyada por la evolución histórica y por las tendencias que cabe esperar en este sector. Las figuras 499 y 500 recogen el escenario BAU de energía total per cápita y el reparto de energía final entre electricidad y energía para generación de calor.

⁸⁴⁶ Aunque muy inferior a las tasas de la E4.

Figura 500. Reparto entre electricidad y energía final para calor en el contexto BAU para el sector industrial.

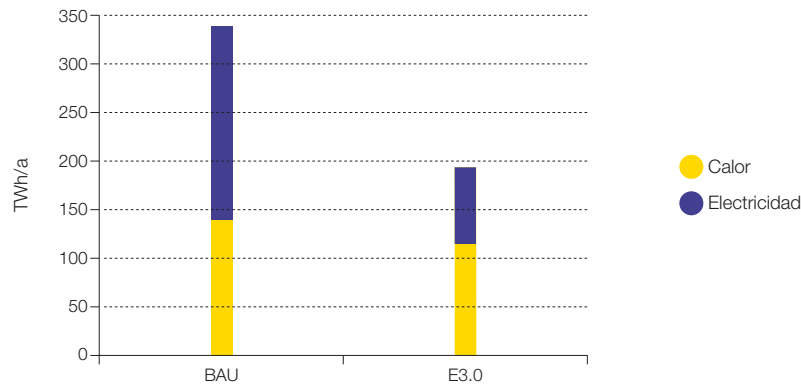


3.8.6 Escenario E3.0

Para el desarrollo del escenario de tecnología E3.0, hemos partido de la demanda de energía final en el contexto BAU para el año 2050 y su descomposición entre electricidad y calor, y le hemos aplicado las medidas de eficiencia anteriormente comentadas para determinar la demanda final y su estructura en el contexto E3.0

en el año 2050. Por lo que respecta a la evolución de la demanda asociada a la tecnología E3.0, el periodo de depresión ocasionado por la crisis se prolonga en el contexto BAU y hace que en el contexto E3.0 ya no se recuperen las tasas de crecimiento positivo al empalmar las tasas decrecientes asociadas a la depresión de la crisis, con las tasas crecientes de introducción de medidas de eficiencia.

Figura 501. Comparativa de las demandas de calor y electricidad en año 2050 para los contextos BAU y E3.0.



Debido a que bastantes de las medidas de eficiencia contempladas para el contexto E3.0 implican una migración de la energía final hacia la electricidad, la electrificación en el contexto E3.0 crece significativamente. La figura 501 recoge la comparativa entre las demandas de electricidad y calor en los contextos BAU y E3.0 para el año 2050.

Por lo que respecta a la cobertura de la demanda térmica en el contexto E3.0, la figura 502 muestra la contribución de las distintas tecnologías consideradas. Sin embargo, tal y como muestran las figuras 503 a 505 esta distribución modal se modifica significativamente para los distintos niveles térmicos.

Figura 502. Contribución de las distintas tecnologías a la cobertura de la demanda térmica del sector industria en el contexto E3.0.

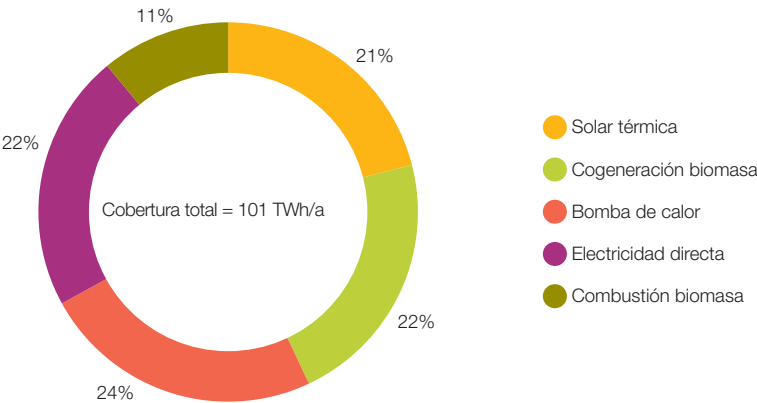


Figura 503. Contribución de las distintas tecnologías a la cobertura de la demanda térmica de baja-media temperatura del sector industria en el contexto E3.0.

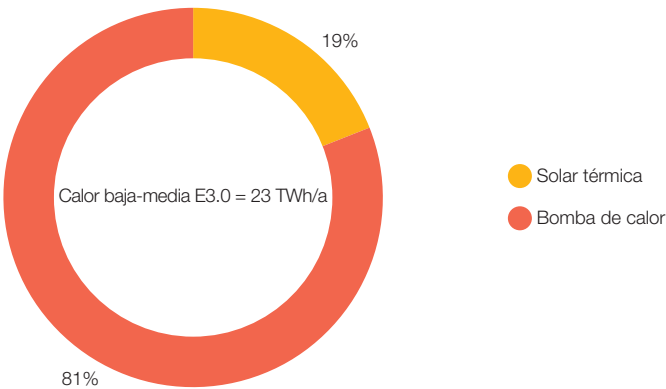


Figura 504. Contribución de las distintas tecnologías a la cobertura de la demanda térmica de media-alta temperatura del sector industria en el contexto E3.0.

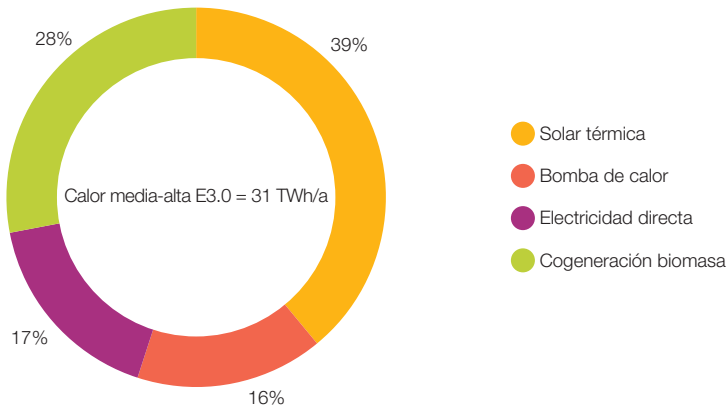
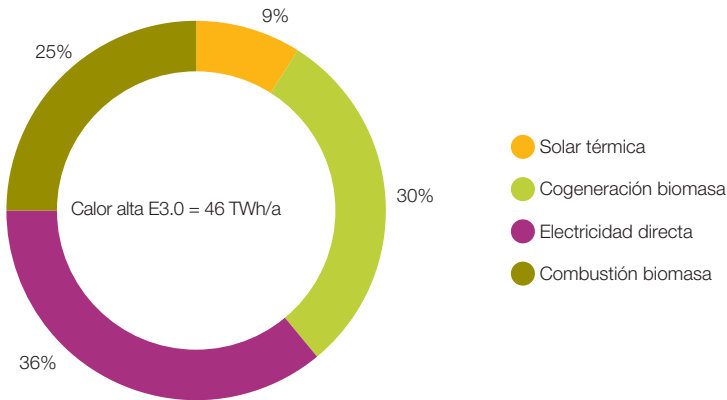


Figura 505. Contribución de las distintas tecnologías a la cobertura de la demanda térmica de alta temperatura del sector industria en el contexto E3.0.



Como hemos comentado anteriormente, la biomasa se emplea en este contexto E3.0 tanto mediante cogeneración vía gasificación, como por combustión directa. En términos de los recursos⁸⁴⁷, la figura 506 recoge la demanda de electricidad y biomasa para el año 2050 en el contexto E3.0.

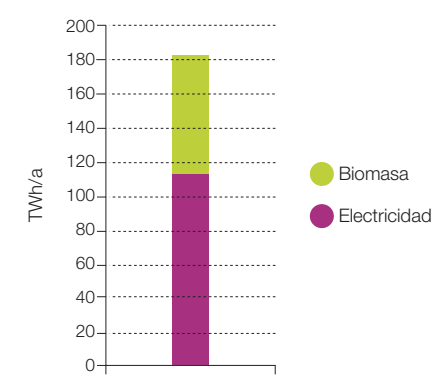
Comparando con otras referencias, el consumo de energía final en el contexto E3.0 para el escenario aquí desarrollado en el año 2050 es del mismo orden de magnitud del que resultaría de aplicar las tasas de evolución planteadas en (Arjun Makhijani, 2050)⁸⁴⁸, e inferior a los valores recogidos

⁸⁴⁷ Estos resultados incluyen el efecto de la gasificación para la cogeneración, y la electricidad es la electricidad neta una vez descontada la electricidad autogenerada por cogeneración.

⁸⁴⁸ Es destacable que en esta referencia esas tasas de evolución se consideran representativas tanto del escenario BAU como del eficiente.

en los escenarios del informe Energy [R]evolution (GP, 2010), lo cual se justifica por las mayores medidas de eficiencia incorporadas en nuestro caso y por el mayor uso de las bombas de calor.

Figura 506. Recursos energéticos en términos de electricidad y biomasa para cubrir la demanda energética del sector Industria en el contexto E3.0 y el año 2050.



Por lo que respecta al requerimiento de biomasa resultante, estos 70 TWh/a se encuentran bastante por debajo del potencial existente, cifrado en (GP, 2005) en 426 TWh/a, pero muy por encima del uso actual de la biomasa en la industria, que según el observatorio de calderas de biomasa estaría en octubre de 2010 en torno a los 0,6 TWh/a en este sector (Ramos J. J., 2010).

La figura 507 nos muestra la comparativa entre la evolución de la demanda de energía final del sector industria en el contexto BAU y la asociada a la tecnología E3.0.

3.8.7 Escenario transición de BAU a E3.0

La transición desde el contexto BAU al E3.0 puede seguir distintas trayectorias según la evolución de los sistemas político, económico y social. Siguiendo en línea con los otros sectores, en la figura 508 mostramos los escenarios de transición resultantes de la

Figura 507. Comparativa de los escenarios de demanda de energía final en el contexto BAU y con la tecnología E3.0 para el sector industria.

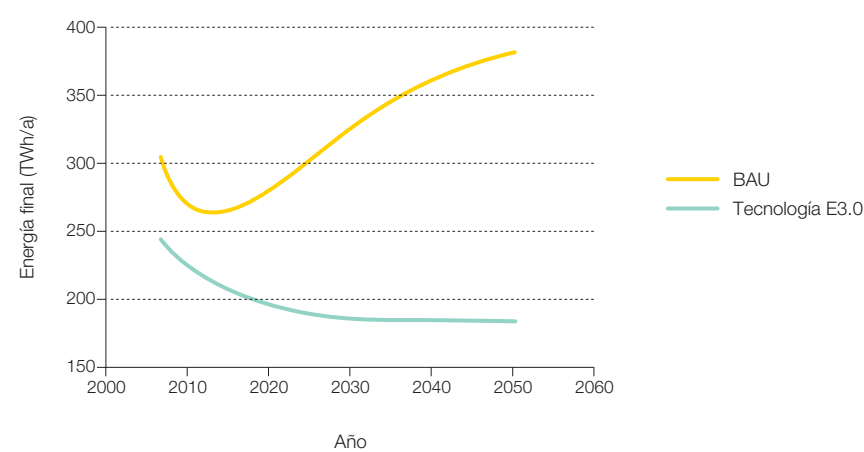
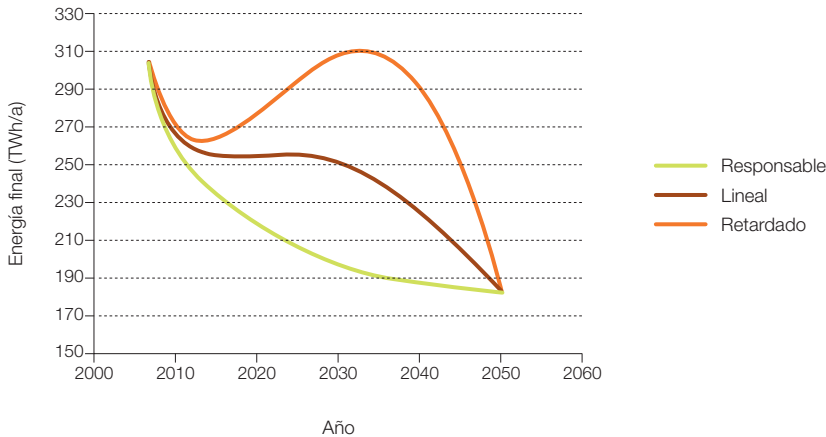


Figura 508. Escenarios de transición del contexto BAU al contexto E3.0 en el sector industria.



aplicación de las tasas retardada, lineal o responsable para desarrollar esta transición.

Es de resaltar el acusado pico interior⁸⁴⁹ de consumo que se genera con el escenario retardado en torno al año 2035, así como las elevadas tasas de reducción que habría que mantener posteriormente durante periodos de tiempo muy elevados. Por el contrario, en el escenario responsable las tasas elevadas de reducción se encuentran limitadas a un corto periodo inicial, en el que aprovechando el tirón de la recesión ocasionada por la crisis se podría desplegar el cambio de una forma mucho menos costosa.

3.9 Escenarios para los otros sectores energéticos

Con la finalidad de completar la imagen proyectada del sector energético, y especialmente por el interés en contrastar los requerimientos sobre el recurso renovable más limitado que tenemos en términos relativos a sus potenciales aplicaciones (la biomasa), hemos añadido a los escenarios de los principales sectores energéticos anteriormente desarrollados otros escenarios para el resto de sectores con implicaciones sobre los recursos energéticos, que a pesar de su carácter más simplificado nos proporcionen una visión de conjunto.

3.9.1 Escenario sector primario

El sector primario (agricultura y pesca) tiene unas implicaciones en términos de GEI que van mucho más allá que su participación en el consumo de energía. Sin embargo, su consumo energético resulta también relevante desde el punto de vista de la asignación de

⁸⁴⁹ Estos picos interiores tienen como consecuencia el requerimiento de sobredimensionar tanto el sistema de generación como el de distribución de energía respecto a lo que sería finalmente necesario, con los correspondientes impactos asociados al desarrollo de esta infraestructura.

recursos de biomasa, pues en gran parte está formado por combustible para la maquinaria agrícola y la flota pesquera. En este punto vamos a elaborar un escenario para la evolución de consumo de energía en este sector, tanto para los contextos BAU como E3.0, si bien el análisis de las medidas de eficiencia que es posible implementar para desplegar el contexto E3.0 es superficial y constituye tan solo una primera aproximación conservadora

a la implementación de medidas de eficiencia en este sector.

La figura 509 nos muestra la evolución de energía final en este sector a lo largo de los últimos 20 años, mientras la figura 510 reproduce la evolución del consumo per cápita en los últimos 10 años. Como podemos observar, a pesar de la tendencia creciente del consumo de energía en este sector en el pasado,

Figura 509. Evolución del consumo de energía final del sector primario (datos Eurostat).

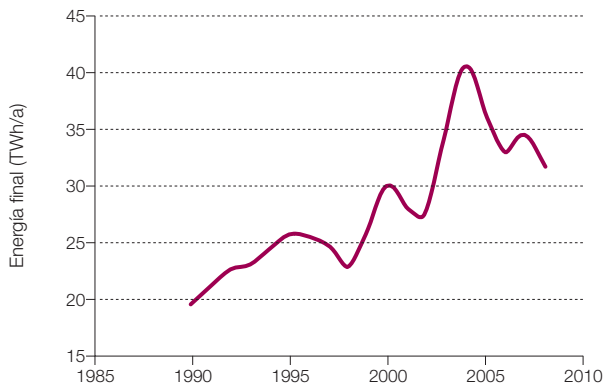


Figura 510. Evolución del consumo de energía final per cápita del sector primario (datos Eurostat).



los últimos años muestran una tendencia decreciente del consumo de energía, que probablemente en parte se explique por un mayor peso de la importación de alimentos.

En la E4 (IDAE, 2003) se recoge una tendencia decreciente del peso del consumo de energía en este sector sobre el consumo total de energía primaria (figura 511), a pesar de eso, esta referencia considera que en el fu-

turo crecerá en términos absolutos el consumo en agricultura por el paso a cultivos de regadío (mayor valor añadido) desde los de secano. En la figura 512 reproducimos los escenarios de referencia y de eficiencia de la E4 hasta 2012 (IDAE, 2003) en los que se aprecia una tendencia creciente a lo largo del tiempo⁸⁵⁰. Por lo que respecta a las medidas de eficiencia del escenario E4, se centran en la maquinaria agrícola y la migración del riego

Figura 511. Evolución del peso del sector primario sobre el consumo de energía primaria total [datos E4 (IDAE, 2003)].

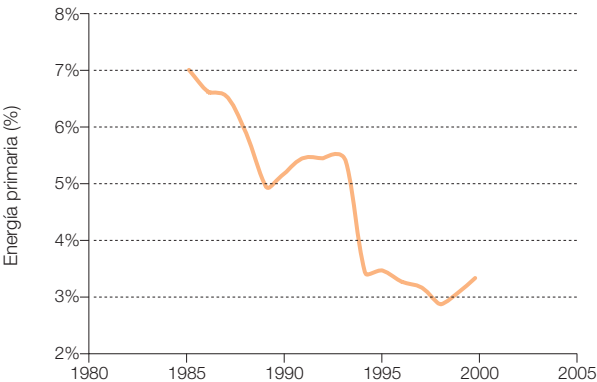
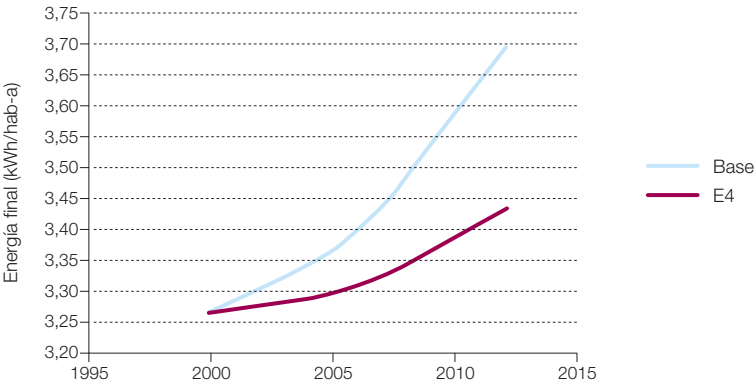


Figura 512. Escenarios de referencia y eficiencia para el sector primario según la E4 (IDAE, 2003).



850 En el Plan de Acción 2008-2012 se añade un escenario con alguna medida de eficiencia adicional (E4+) que supone un ligero ahorro (0,6% para el año 2012) respecto al escenario E4 pero que no modifica el pronóstico de tendencia creciente del incremento de consumo en este sector. La E4+ introduce como medidas de eficiencia adicionales a las de la E4 la mejora en la propulsión de la flota pesquera y la migración desde la agricultura tradicional a la agricultura de conservación.

por aspersión al localizado, por ser en estos subsectores donde se localiza la mayoría del consumo.

Por lo que respecta a la estructura subsectorial de la demanda de energía en este sector, en las figuras 513 y 514- recogemos la existente en el año 2001 y la proyectada por la E4 para el año 2012 en el escenario de referencia.

Para el desarrollo del escenario BAU adoptamos uno que pase por los puntos definidos por el escenario E4+ del plan de acción 2008-2012 (IDAE, 2007) hasta 2012, con un tendencial de consumo creciente pero con tasas anuales decrecientes a partir de ese momento. Por lo que respecta a la electrificación, planteamos un escenario de electrificación creciente en el sector, asociado a mantener la

Figura 513. Reparto subsectorial del consumo de energía final en el sector primario en el año 2001 [datos (IDAE, 2003)].

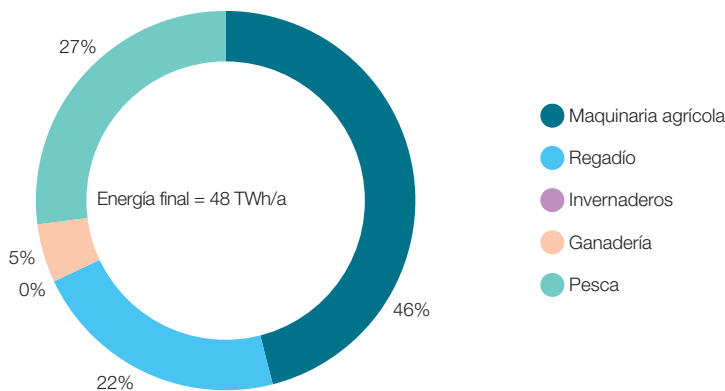
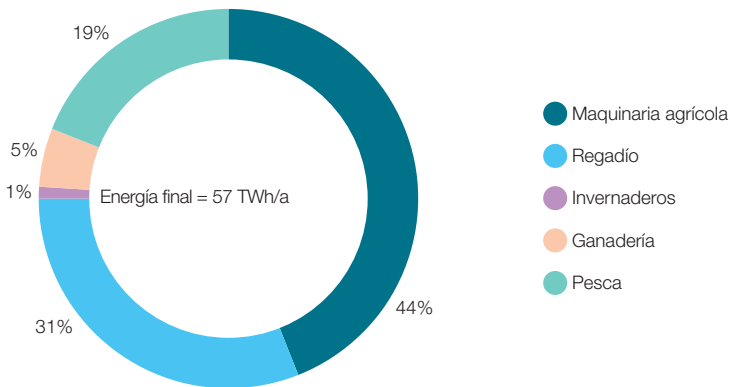


Figura 514. Reparto subsectorial del consumo de energía final en el sector primario en el año 2012 para el escenario de referencia de la E4 [datos (IDAE, 2003)].



tendencia de electrificación de los regadíos y de introducir mayor electrificación en invernaderos y explotaciones ganaderas. La figura 515 reproduce el escenario BAU resultante que vamos a adoptar para este estudio.

Para el desarrollo del escenario E3.0 partimos del escenario BAU para el año 2050 y le aplicamos medidas adicionales de eficiencia que pueden resumirse de la siguiente forma⁸⁵¹:

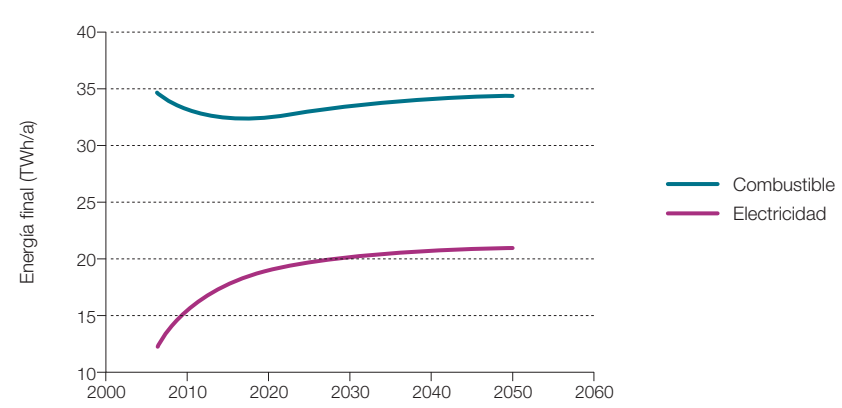
- Maquinaria agrícola:
 - Reducción de laboreos no productivos (5%).
 - Mejora de eficiencia en tractores operados con combustible (10%).
 - Electrificación de un 20% de la maquinaria agrícola⁸⁵².
- Regadío:
 - Mejora de bombeo y redes (5%).
 - Riego inteligente (20%).
- Invernaderos:
 - Ingeniería bioclimática (50%).
 - Mejora de la eficiencia en sistemas climatización (30%).

- Ganadería:
 - Ingeniería bioclimática (40%).
 - Mejora de la eficiencia sistemas climatización (30%).
 - Reducción del consumo de carne⁸⁵³ (30%).
- Pesca:⁸⁵⁴
 - Mejora de la eficiencia de propulsión (10%).
 - Mejora de los motores de combustión interna (20%).
 - Electrificación de un 20% de la flota⁸⁵⁵.

La contribución al ahorro total en este sector de cada uno de los subsectores considerados es la que recogemos en la figura 516.

En estas condiciones, la figura 517 nos recoge la evolución del consumo de energía final del sector primario en los contextos BAU y con la tecnología E3.0.

Figura 515. Escenario BAU para el sector primario.



⁸⁵¹ Entre paréntesis indicamos el porcentaje de mejora de la medida correspondiente. Sin embargo, estos porcentajes no son aditivos por actuar sobre valores de referencia afectados por las otras medidas de eficiencia.

⁸⁵² En términos del combustible originalmente usado. Es decir, el planteamiento es de sistema híbridos que puedan realizar parte de sus labores (por ejemplo desplazamiento de tractores) mediante sistemas de propulsión eléctricos, pudiendo desarrollar otras labores alimentadas por motores de combustión interna. Lo cual no quita que en algún caso particular alguna maquinaria pueda ser completamente electrificada.

⁸⁵³ En este caso, el porcentaje se refiere a la implicación de la medida sobre la reducción del consumo de energía de operación para producir los alimentos.

⁸⁵⁴ Para el caso de la ganadería hemos incluido una medida de eficiencia asociada a la reducción del consumo de carne, pero en el caso de la pesca no hemos considerado como medida adicional la reducción del consumo de pescado. En ambos casos se trata de medidas muy relacionadas con el cambio de hábitos de la población, por lo que en principio no hemos querido tirar demasiado de ellas para configurar el contexto E3.0. Sin embargo, para el caso del consumo de carne, consideramos que existe un mayor margen de maniobra (elasticidad) para implementar un cierto porcentaje de cambio, en base tanto a argumentos energéticos como argumentos de cambio climático (emisiones de metano). Pero para el caso de la pesca, consideramos que existe un menor margen de maniobra como para justificar una medida de este estilo basado en argumentos energéticos.

⁸⁵⁵ Planteamiento de operación híbrida de los sistemas de propulsión.

Figura 516. Efecto agregado de las medidas de eficiencia en cada uno de los subsectores del sector primario sobre el ahorro total obtenido para el contexto E3.0.

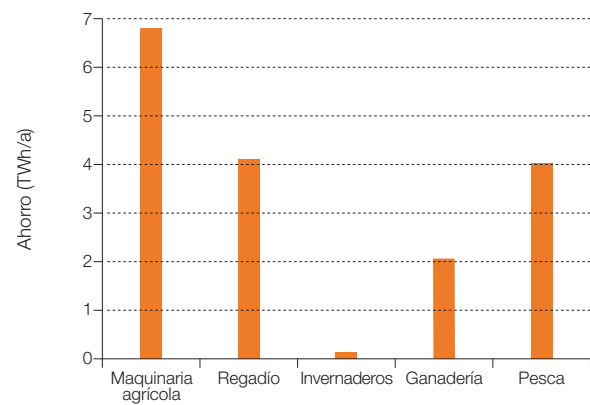


Figura 517. Escenarios BAU y de tecnología E3.0 para el sector primario.

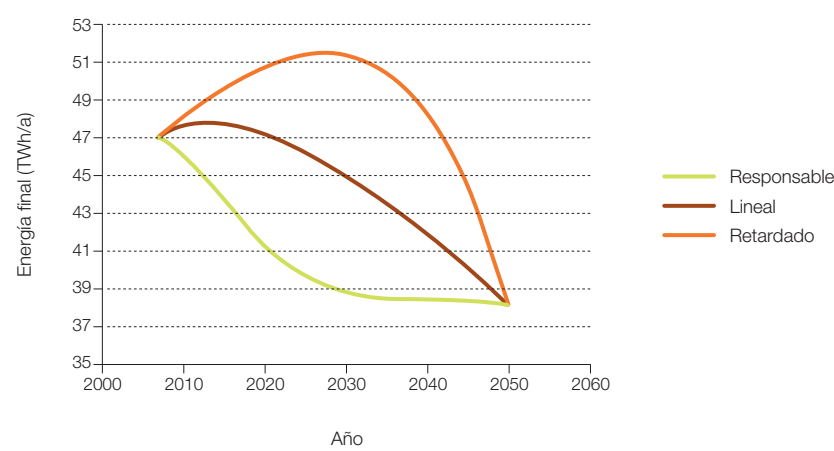
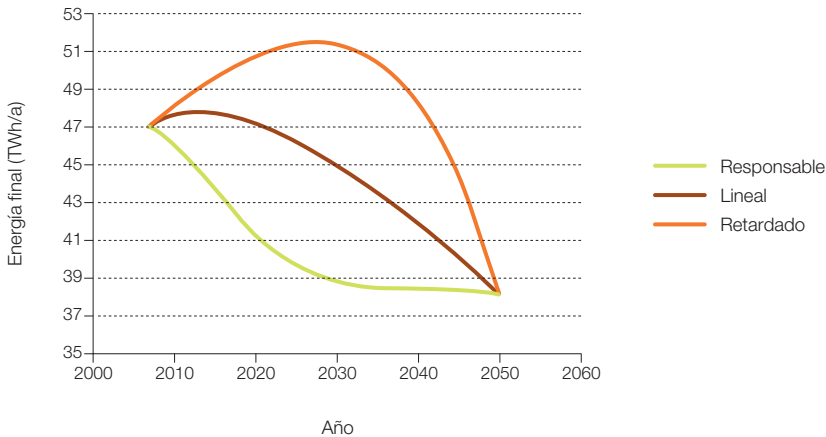


Figura 518. Escenarios de transición del contexto BAU al E3.0 para el sector primario.



Y en línea con el planteamiento realizado con los escenarios de otros sectores, en la figura 518 recogemos los tres escenarios de transición (retardado, línea y responsable) del contexto BAU al E3.0.

Los resultados hasta aquí presentados recogen el impacto energético del sector primario en términos de la energía final contabilizada por el sector energético. En estos términos el sector primario puede parecer relativamente poco importante. Pero realmente el sector primario involucra unos flujos energéticos considerablemente superiores debido, por un lado, a la biomasa alimenticia que maneja y que no aparece contabilizada en los balances energéticos del sector primario y, por otro lado, a sus interacciones con otros sectores. Para proporcionar una valoración del peso de la biomasa alimenticia, así como para cuantificar las implicaciones de los cambios de actitud en elementos tan cercanos a nosotros como es nuestra alimentación, y para apreciar en términos relativos las interacciones entre este sector y otros como el transporte o el industrial, vamos a analizar algunos resultados relativos

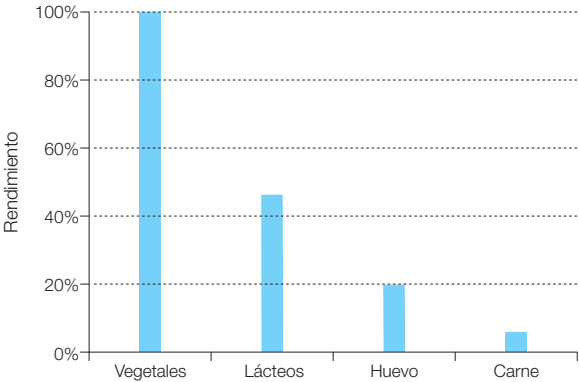
a las implicaciones energéticas de la forma en que nos alimentamos⁸⁵⁶.

Nuestro metabolismo requiere el aporte de una cantidad de energía del orden de 3 kWh/p-d para su correcto funcionamiento. Esta energía la obtenemos a partir de la biomasa que ingerimos, y no aparece reflejada en los balances energéticos del sector primario, así como tampoco aparecen reflejados gran parte de los efectos de la ineficiencia con la que producimos esta biomasa alimentaria pues, en gran medida afectan a un mayor requerimiento de este tipo de biomasa. Sin embargo, las implicaciones energéticas de la forma en la que decidamos alimentarnos son importantes como consecuencia de las grandes diferencias entre los rendimientos energéticos asociados a la elaboración de los distintos tipos de alimentos. En efecto, tal y como nos muestra la figura 519, en términos exclusivamente⁸⁵⁷ del uso de la biomasa para la producción de distintos tipos de alimentos, los rendimientos energéticos pueden oscilar entre del orden del 100% para los vegetales hasta un 6% para la carne.

⁸⁵⁶ Buena parte de los valores numéricos de partida que hemos empleado para elaborar este aspecto corresponden a las estimaciones presentadas en (MacKay, D.J.C., 2008).

⁸⁵⁷ La producción de alimentos requiere de otros consumos energéticos adicionales a los aportes de biomasa que no están contabilizados en estos rendimientos.

Figura 519. Rendimiento energético asociado al uso de biomasa para producir distintos tipos de alimentos.



Adicionalmente al consumo de biomasa, la producción de alimentos requiere de otros aportes energéticos para la operación de maquinaria, la climatización e iluminación de edificios del sector primario, la producción de fertilizantes, la fabricación de elementos de empaquetado, el transporte por carretera y barco de los alimentos y sus embalajes, y la operación de supermercados u otros comercios donde se distribuyen estos alimentos. Y tanto los consumos energéticos en términos de biomasa, como los correspondientes a los otros elementos de consumo comentados, presentan una fuerte dependencia de la forma con que nos alimentemos.

Por tanto, como vemos, la alimentación tiene implicaciones energéticas que van bastante más allá de parte de los requerimientos energéticos del sector primario recogidos en los balances de energía, y abarcan todos los otros sectores energéticos principales (edificación, transporte e industria), y se extienden más allá de la frontera de los balances energéticos para abarcar a la biomasa alimentaria. Y el consumo energético total asociado a nuestra alimentación se ve fuertemente

afectado por nuestros hábitos y actitudes frente a ella.

Para ilustrar estos efectos con un ejemplo numérico, consideremos cuatro dietas tipo con el mismo aporte energético total: vegana, ovo-lacto vegetariana, omnívora y carnívora. La vegana consiste exclusivamente de vegetales, mientras que para las otras tres, las figuras 520 a 522 recogen su estructura en términos de aportes energéticos. Adicionalmente consideremos distintos grados de dependencia de aportes energéticos adicionales a la biomasa alimenticia, que caracterizaremos por el carácter “bio”⁸⁵⁸ y “local”⁸⁵⁹ del origen de los alimentos.

858 Refleja el origen de los alimentos en agricultura y/o ganadería ecológicas, y la limitación de los embalajes.
859 Refleja la producción de los alimentos cercana al punto de consumo final.

Figura 520. Ejemplo de dieta ovo-lacto vegetariana en términos de aportes energéticos.

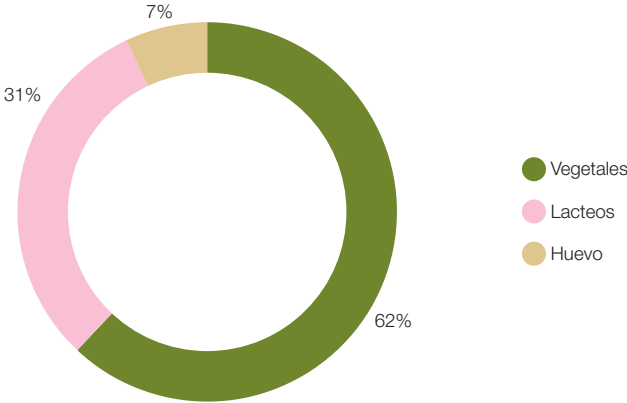


Figura 521. Ejemplo de dieta omnívora en términos de aportes energéticos.

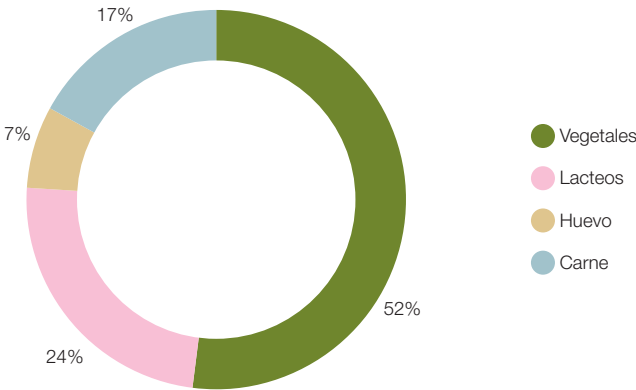


Figura 522. Ejemplo de dieta carnívora en términos de aportes energéticos.

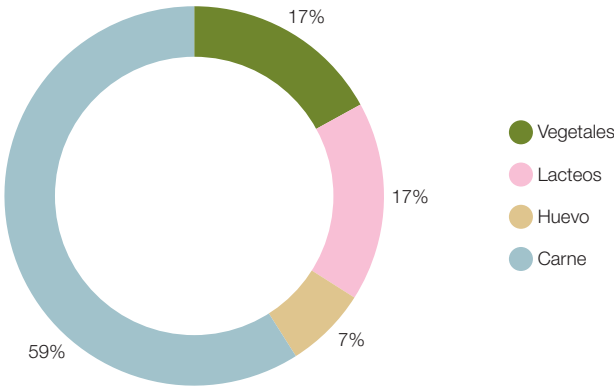


Figura 523. Implicaciones en términos del consumo de energía total de distintos hábitos alimenticios en términos de consumo diario per cápita.

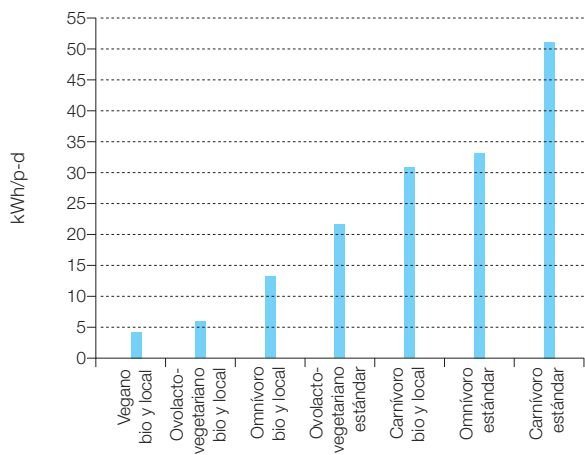
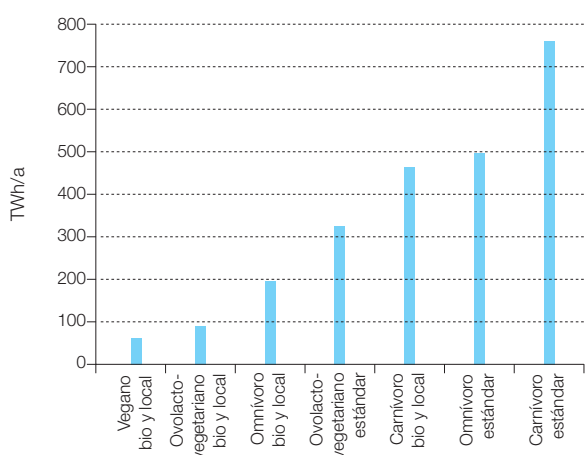


Figura 524. Implicaciones en términos del consumo de energía total de distintos hábitos alimenticios en términos del consumo anual total correspondiente a la población peninsular en el año 2007.



En estas condiciones, la figura 523 nos recoge las implicaciones del consumo energético total per cápita y día asociado a distintas combinaciones de dieta y de su carácter “bio” y “local”⁸⁶⁰. Como podemos apreciar, las diferencias entre los distintos hábitos alimenticios

son muy importantes, con un factor de 1 a 12 entre una dieta vegana bio y local a una dieta carnívora estándar.

Si extrapolamos estos resultados a la población peninsular en el año 2007, las implicaciones

⁸⁶⁰ Estos resultados hay que interpretarlos tan solo como un ejemplo numérico para cuantificar el abanico de posibilidades existente. Pero en la práctica hay otras variables independientes no reflejadas en estos resultados. Una de ellas es el hecho de que en ciertos emplazamientos (por ejemplo regiones montañosas) la dieta carnívora o la producción de productos lácteos puede no introducir penalización energética alguna por el hecho de constituir la única opción para la producción de biomasa alimenticia, y el ganado constituye la única alternativa para recolectar la producción de biomasa de estos ecosistemas, sin que los prados en los que se alimentan sustituyan a otros cultivos alimenticios. Otro caso donde se da esta situación es en las ocasiones en que el ganado se alimenta con biomasa residual, como en las aplicaciones familiares tradicionales.

energéticas asociadas a los distintos hábitos alimenticios en términos del consumo total de energía serían las mostradas en la figura 524. Para contextualizar estos niveles de consumo energético conviene recordar que el consumo total de energía final que figura en el balance⁸⁶¹ de la AIE para el año 2007 es de 1193 TWh/a, y que el techo del recurso de biomasa energética en la España peninsular asciende a 426 TWh/a, y se queda en 273 TWh/a si excluimos la biomasa residual (GP, 2005).

De los resultados correspondientes a este ejemplo, podemos concluir el gran impacto que nuestros hábitos⁸⁶² y actitudes pueden tener sobre nuestra demanda de recursos, y en particular de energía.

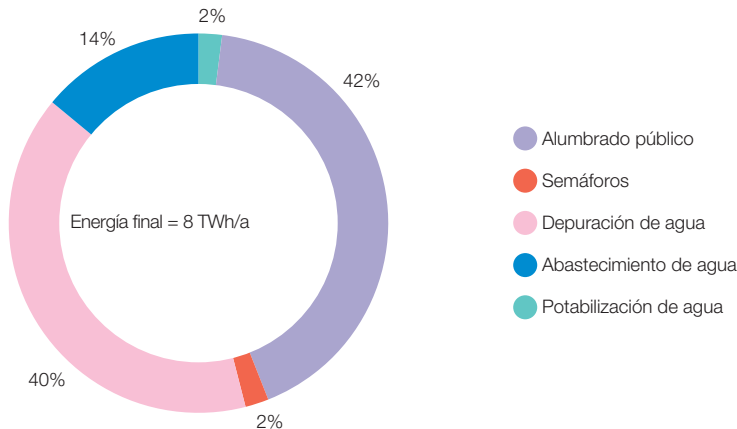
3.9.2 Escenario sector servicios públicos

La figura 525 nos recoge la estructura subsectorial del consumo de energía final del sector servicios públicos en el año 2004. Como

podemos observar, este sector se encuentra dominado por el alumbrado público y por los consumos de bombeo y aireación asociados al suministro y depuración de aguas. Planteando medidas de eficiencia en estos subsectores y sustituyendo los semáforos incandescentes por LED, en el Plan de Acción de la E4 para el periodo 2008-2012 se plantea revertir la tendencia creciente histórica de este sector tal y como recoge la figura 526.

Para el desarrollo del escenario BAU, partimos del escenario E4+ del Plan de Acción 2008-2012 (IDAE, 2007). Con las TAE de reducción de consumo planteado en esta referencia para el periodo 2004-2012, extrapolándolas hasta el año 2050, definimos el consumo BAU de este sector al final del escenario. Sin embargo, a la vista de la evolución tendencial en los últimos años, parece difícil pasar por el punto definido por la E4+ para el año 2012, por lo que relajamos esta condición permitiendo que el consumo en ese año para el contexto BAU sea ligeramente superior, pero manteniendo el valor final para el año 2050.

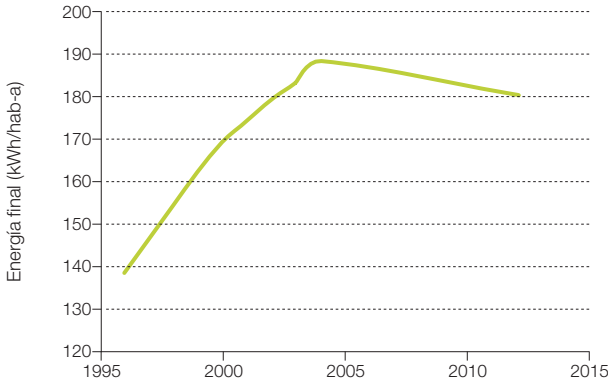
Figura 525. Estructura subsectorial del consumo de energía final del sector servicios públicos en el año 2004 [Datos de (IDAE, 2007)].



861 Es preciso recordar que estos balances no incluyen la contribución de la biomasa alimenticia que sí que recogemos los resultados que presentamos en este punto.

862 Evidentemente esto no quiere decir que todo el mundo se tenga que pasar a una dieta vegana, lo cual representaría un cambio de hábitos excesivamente brusco y por tanto poco sostenible, pero sí que nos proporciona una llamada de atención para que tomemos conciencia de las implicaciones de nuestros hábitos e introduzcamos actitudes adaptativas en la medida de lo posible. De hecho resulta interesante resaltar el hecho de que los atributos "bio" y "local", pueden tener un efecto energético del orden de magnitud del asociado al tipo de dieta, y estos son elementos que se pueden incorporar sin las implicaciones asociadas a un cambio brusco de dieta.

Figura 526. Evolución histórica y proyección para el escenario eficiente (E4+) del consumo de energía final del sector servicios públicos (IDAE, 2007).



Para la elaboración del escenario E3.0 partimos del hecho de que en el escenario E4+ no se ha completado el despliegue de medidas de eficiencia indicadas en la E4, cuyo potencial permitiría reducir significativamente más el consumo de energía en este sector. Partiendo del potencial indicado por la E4, de cara al contexto E3.0 para el año 2050, añadimos las siguientes medidas de eficiencia, que conducen a la reducción adicional de consumos indicada en la figura 527:

- Lámparas:
 - Incremento eficacia lumínica a 200 lm/W.
- Luminarias:
 - Mejora de su rendimiento, acoplado al de la envolvente de las superficies iluminadas para reducir la contaminación lumínica.
- Controles inteligentes de iluminación:
 - Variación dinámica del nivel de iluminancia con las necesidades reales y con discretización espacial.
- Bombeo: baja la caída de presión por reducción del consumo de agua debido al

incremento de la eficiencia en uso y distribución, así como al aprovechamiento de aguas pluviales y grises reutilizadas.

- Velocidad variable y motores inteligentes.
- Depuración:
 - Motores más eficientes.
 - Regulación inteligente.
 - Reducción volumen aguas residuales por separación aguas grises.
- Semáforos:
 - Mejora LEDs respecto a actuales.
- Potabilización:
 - Mejora de bombeos.
 - Reducción en el consumo de agua por incremento de la eficiencia en el uso y distribución.

Figura 527. Comparación de la estructura de consumo de energía final del sector servicios públicos en el año 2004, desplegando el total del potencial de medidas de eficiencia indicadas en la E4 (potencial E4), y con el conjunto de medidas de eficiencia consideradas para el contexto E3.0 en el año 2050.

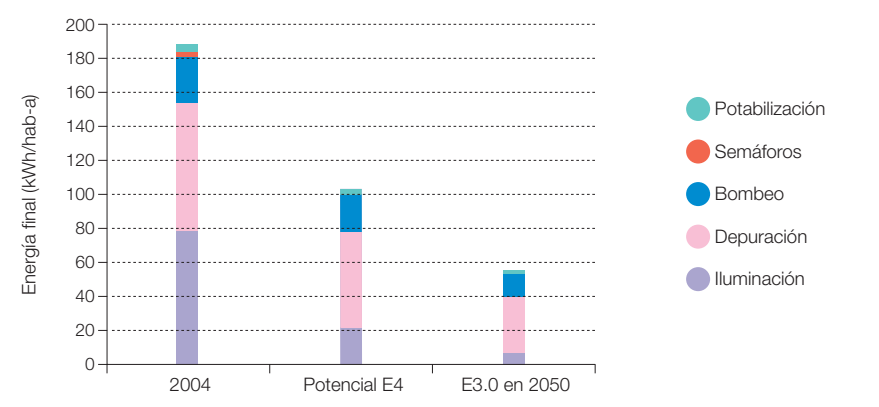
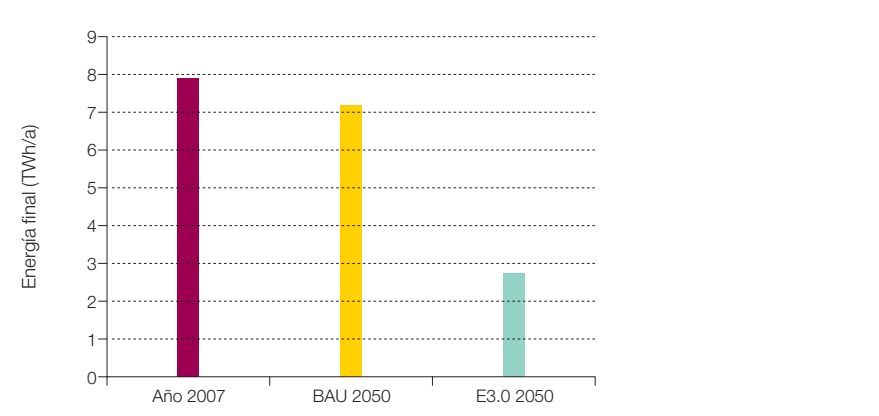


Figura 528. Comparativa del consumo de energía final actual y en el año 2050 para los contextos BAU y E3.0.



En estas condiciones, la figura 528 nos muestra la comparativa entre el consumo en el año 2007 y los consumos en el año 2050 para los contextos BAU y E3.0 para el sector servicios públicos, mientras que la figura 529 recoge la evolución del contexto BAU y la tecnología E3.0 a lo largo del tiempo.

Por último, siguiendo con el planteamiento de los otros escenarios, en la figura 530 plasmos tres posibles escenarios de transición del contexto BAU al E3.0.

Figura 529. Evolución del consumo de energía en los contextos BAU y con la tecnología E3.0.

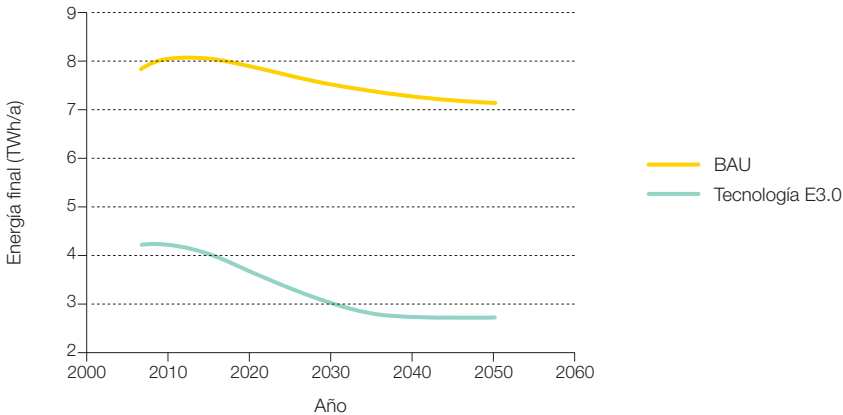
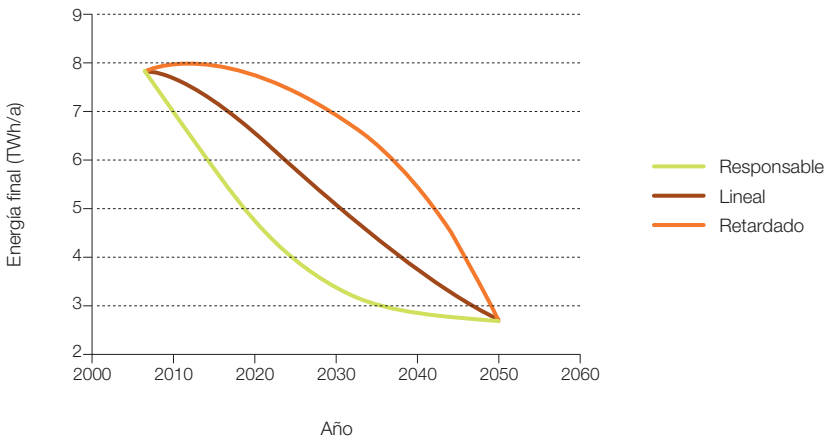


Figura 530. Escenarios de transición desde el contexto BAU al contexto E3.0 del sector servicios públicos.



863 Los usos no energéticos son las aplicaciones de combustibles fósiles como materia prima para elaborar otros productos, sin que del proceso se obtenga energía, y se encuentran fuertemente dominados por las materias primas a la industria petroquímica. Así pues, la producción de productos plásticos y otros productos químicos emplea como materia prima una cierta cantidad de combustibles fósiles que son los recogidos en esta categoría, y que por orden de importancia serían productos petrolíferos, gas natural y carbón. Adicionalmente, la producción de estos productos requiere de un consumo de energía, que en la actualidad está también asociado a un consumo adicional de combustibles fósiles, cuyo monto aparece contabilizado dentro del sector industria.

864 Datos del balance energético de la AIE para el año 2007.

3.9.3 Escenario sector usos no energéticos

Por último, recogemos el sector de usos no energéticos⁸⁶³ que es relevante desde nuestro punto de vista por su total dependencia actual de los combustibles fósiles. En este sentido resulta interesante disponer de una estimación

de cuáles serían sus requerimientos de biomasa si fuera necesario producir biocombustibles por el eventual agotamiento de los combustibles fósiles.

La contribución en términos energéticos de este sector es relevante y alcanza en España los 92 TWh/a para el año 2007⁸⁶⁴.

En los escenarios desarrollados en (GP, 2010) para este sector en el marco de la OCDE-Europa se plantea una evolución decreciente como la mostrada en la figura 531, considerando el mismo escenario para el caso de referencia que para los escenarios eficientes, y manteniendo el reparto modal entre los tipos de combustibles fósiles.

Para el desarrollo del escenario BAU adoptaremos las tasas de decrecimiento del escenario

de referencia del estudio Energy [R]evolution, partiendo de la condición en el año 2007 correspondiente al balance de la AIE para España.

De cara al contexto E3.0 existen una serie de medidas que pueden conducir a la reducción de la demanda de este sector, tanto por la mejora de procesos de producción, como por la desmaterialización de la economía. A falta de un análisis más detallado sobre el potencial de estas medidas, limitaremos la reducción a

Figura 531. Consumo de energía del sector usos no energéticos para los escenarios desarrollados en el estudio Energy [R]evolution (GP, 2010).

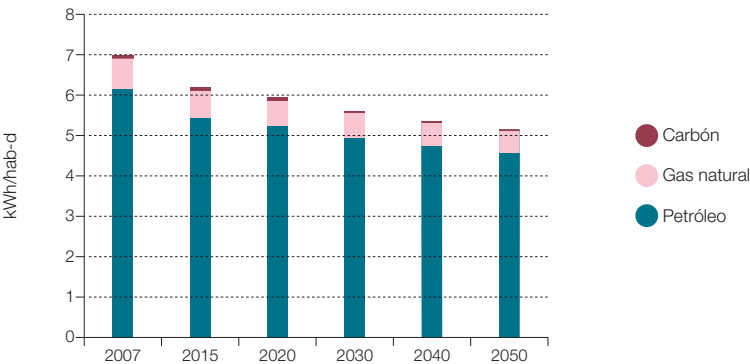


Figura 532. Escenarios del contexto BAU y el de tecnología E3.0 para el sector de usos no energéticos.

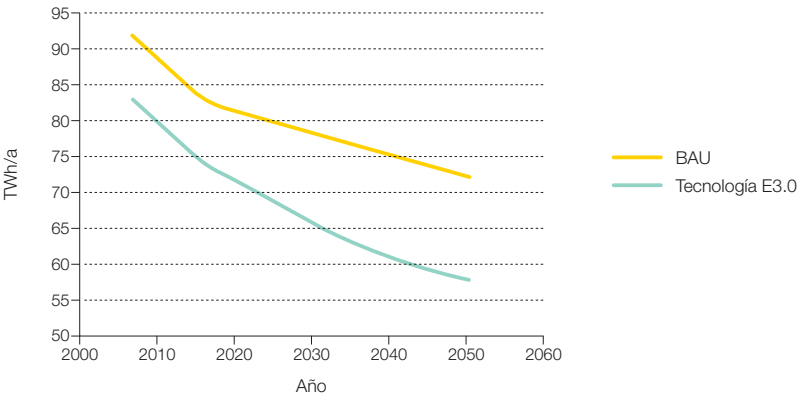
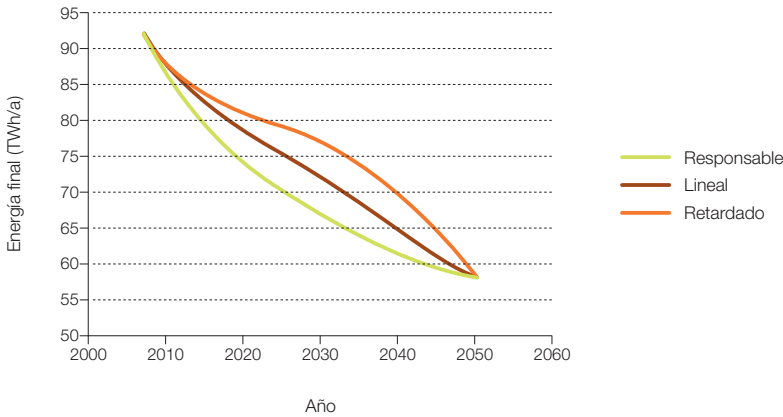


Figura 533. Escenarios de transición del contexto BAU al E3.0 en el sector de usos no energéticos.



un 20% en el año 2050. En estas condiciones los escenarios BAU y de tecnología E3.0 resultantes son los indicados en la figura 532, mientras que la figura 533 recoge tres posibles escenarios de transición del contexto BAU al E3.0.

3.10 Escenarios demanda energética total

En este punto agrupamos todos los escenarios anteriormente desarrollados para obtener la visión global del conjunto del sector energético por lo que respecta a la evolución de su consumo de energía en los contextos BAU y E3.0.

En la figura 534 recogemos los valores acumulados de consumo de energía final, tanto en el año 2007, como para el año 2050 en los contextos BAU y E3.0. En esta misma figura presentamos el desglose por tipo de energía final, distinguiendo entre electricidad y combustibles, diferenciando dentro de los combustibles la parte de biomasa ya comprometida en el sector industria para el contexto

E3.0. El resto de demanda de combustibles, en un contexto E3.0 100% renovable deberá cubrirse con combustibles derivados de la biomasa o con hidrógeno generado con electricidad procedente de fuentes renovables. Más adelante retomaremos estas dos posibilidades para evaluar su viabilidad y sus implicaciones. En el contexto BAU los combustibles son fósiles.

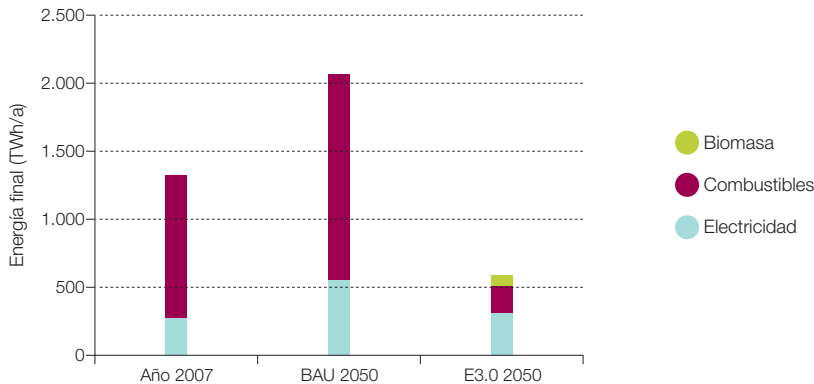
De estos resultados, lo primero que podemos concluir es el gran potencial de las medidas de eficiencia energética, proporcionado en el año 2050 un consumo que es un 45% del registrado en el año 2007, y un 28% del que nos proporcionaría un escenario BAU.

El contexto BAU⁸⁶⁵ nos conduciría en 2050 a un consumo del 157% del registrado en el año 2007, siendo el incremento en la demanda de combustibles de un 146% y en la electricidad de un 199%. Esta situación es totalmente insostenible la miremos por donde la miremos:

- Si nos centramos en la demanda de combustibles, para esas fechas probablemente

865 Conviene recordar aquí que en muchos sentidos el BAU desarrollado en este estudio es significativamente más eficiente que otros BAU a los que podría conducirnos la trayectoria actual, y por tanto hay que entender estos resultados como una evaluación conservadora de los problemas que nos podría acarrear permitir que los acontecimientos se desarrollen por una trayectoria BAU.

Figura 534. Consumo total de energía final y desglose por tipo de energía final. La biomasa indicada en el contexto E3.0 corresponde al uso ya comprometido para el sector industria. Los combustibles en el contexto BAU son mayoritariamente fósiles, y en el E3.0 son combustibles procedentes de la biomasa o bien hidrógeno de origen renovable.



ni tan solo estén disponibles a precios razonables los recursos de combustibles fósiles para cubrir esa demanda. Por lo que respecta a los costes económicos asociados al consumo de esa cantidad de combustibles fósiles, representarían un incremento de nuestra factura energética considerablemente superior al del incremento en el consumo de energía, como consecuencia de la tendencia fuertemente inflacionista de los combustibles fósiles que cabe esperar que se despliegue en este periodo de tiempo como consecuencia de la limitación del recurso y el gran incremento de la demanda en el mercado internacional, pero sobre todo introducen una incertidumbre significativa por la dificultad de pronosticar los precios de los combustibles fósiles en este periodo de tiempo⁸⁶⁶. De cualquier forma, el argumento principal para intentar evitar el llegar a esta situación es el asociado al incremento de emisiones de GEI correspondiente a este incremento de la demanda de energía. Si como alternativa nos planteáramos la posibilidad de cubrir esa demanda correspondiente al

contexto BAU mediante biomasa, los requerimientos de biomasa en relación al potencial disponible en nuestro país evaluado en el estudio Renovables 2050 (GP, 2005), serían del 532% teniendo en cuenta el total de recurso de biomasa, y del 830% si nos centramos en el potencial de cultivos energéticos⁸⁶⁷.

- Por lo que respecta a la demanda de electricidad, el contexto BAU requeriría prácticamente doblar la capacidad de generación y transporte actual, por lo que si bien disponemos de recurso renovable más que suficiente para cubrir esta demanda, su coste económico sería bastante más del doble del correspondiente a cubrir nuestra demanda eléctrica actual con renovables, pues además de doblar la capacidad de generación, habría que ampliar muchísimo las infraestructuras de transporte y distribución. Más allá del elevado coste económico, esta gran cantidad de infraestructuras eléctricas conducirían a un impacto ambiental que podemos evitar mediante la aplicación de las medidas de eficiencia del contexto E3.0.

866 A modo de cuantificación del efecto económico que cabe esperar asociado a ese incremento del 57% en el consumo final de energía entre el año 2007 y 2050 dentro del contexto BAU, con una tasa de descuento del 3% y en euros constantes de 2007, el incremento en el coste de la factura energética sería del 136% si la tasa de inflación anual media de la energía procedente de combustibles fósiles fuera del 4%, y llegaría a ser del 1.050% para una tasa de inflación anual media de la energía procedente de combustibles fósiles del 8%. De todos modos, es importante apuntar que la inflación de los combustibles fósiles debería incluir la internalización de su impacto además de la limitación de la oferta en relación a la demanda, y en la situación actual de crisis climática aguda, la internalización del coste asociado a la liberación de esa cantidad de carbono adicional a la biosfera puede conducir a costes (y por tanto tasas de inflación) muy superiores, y de hecho impagables...

867 Incluyendo como tales la explotación del monte bajo.

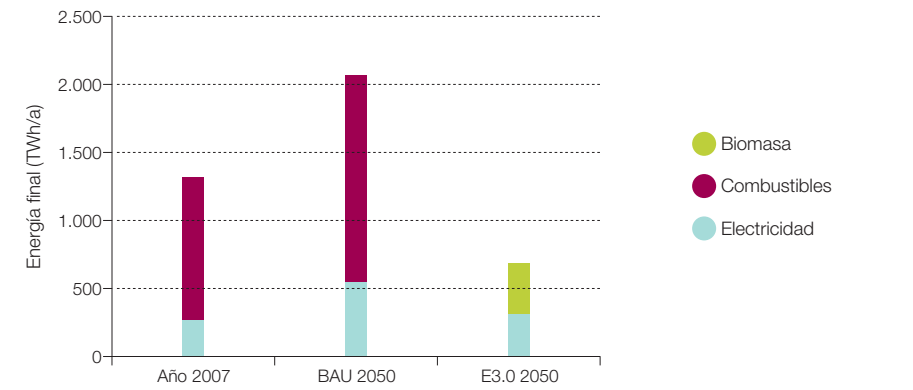
Por lo que respecta al contexto E3.0, la gran reducción en la demanda de combustibles nos permite plantearnos su cobertura incluso con el limitado recurso de biomasa del que disponemos en nuestro país⁸⁶⁸, y la demanda eléctrica finalmente resultante, a pesar de la gran electrificación experimentada en el contexto E3.0, es tan solo de un 114% del valor de la demanda eléctrica actual, por lo que prácticamente nos podría servir la infraestructura de transporte y distribución actuales⁸⁶⁹ para cubrir esta demanda eléctrica, eliminando por tanto los impactos ambientales y costes económicos asociados a una gran ampliación de esta infraestructura. Comparando el consumo eléctrico en el año 2050, para el contexto E3.0 tenemos un consumo que es un 57% del asociado al contexto BAU, por lo que el coste asociado a esta generación de electricidad con fuentes renovables sería de menos de la mitad⁸⁷⁰ que el correspondiente a la demanda del contexto BAU⁸⁷¹.

Evidentemente, el despliegue de las medidas de eficiencia asociados al contexto BAU tiene

sus costes asociados (coste del negavatio), pero tal y como mostramos en el análisis de costes desarrollado para el sector edificación en relación a una de las medidas de eficiencia de mayor coste en ese sector, existe un amplio margen de despliegue de medidas de eficiencia que mantienen costes marginales significativamente inferiores al coste de la energía⁸⁷².

Retomando la discusión sobre la cobertura de la demanda de combustibles en el contexto E3.0, la figura 535 nos presenta los resultados si optamos por cubrir el total de la demanda de combustibles en el contexto E3.0 con biocombustibles producidos⁸⁷³ a partir de biomasa. En estas condiciones, el requerimiento total de biomasa ascendería a 372 TWh/a, que constituye un 87% del total del recurso de biomasa disponible, y un 136% si nos limitamos al recurso de biomasa de cultivos energéticos⁸⁷⁴ (GP, 2005). Por tanto, si bien vemos que la demanda de biomasa queda dentro del potencial de este recurso en nuestro país, el porcentaje del potencial que deberíamos explotar parece

Figura 535. Consumo de energía si para el contexto E3.0 empleamos biomasa para producir los biocombustibles necesarios para cubrir la demanda de combustibles. Los combustibles en el contexto BAU son mayoritariamente fósiles.



868 Aunque tal y como comentaremos más adelante esta no sea probablemente la mejor opción tanto desde el punto de vista económico como de impacto ambiental.

869 Incorporándole las mejoras y componentes de inteligencia que permitan optimizar la operación del sistema basado en energías renovables.

870 El menor nivel de consumo permite explotar los mejores recursos renovables (menor coste), y la inteligencia desplegada por el sistema eléctrico permite la integración de mayor cantidad de renovables reduciendo mucho los requerimientos de potencia específica (múltiplo solar) a instalar. Por estos motivos, la reducción del coste va más allá de la reducción en el consumo.

871 Es importante recalcar que esta comparativa es para el caso de que la demanda de electricidad en el contexto BAU se cubriera con renovables, que no se corresponde con el planteamiento del escenario BAU. En el caso correspondiente al contexto BAU en que la generación de electricidad retiene una importante contribución fósil en la generación de electricidad, el incremento del coste respecto al caso E3.0 es muy superior tal y como se deduce de la cuantificación anteriormente presentada para distintas hipótesis sobre la inflación de los combustibles fósiles durante este periodo.

872 De hecho, tal y como comentábamos en el análisis sobre la economía del ahorro que desarrollamos en el capítulo dedicado al sector edificación, una buena parte de las medidas de eficiencia puede ofrecer incluso costes negativos del negavatio si se desarrollan en un entorno regulatorio y de mercado favorables.

873 Hemos considerado un rendimiento del orden del 67% para la producción de biocombustibles a partir de la biomasa.

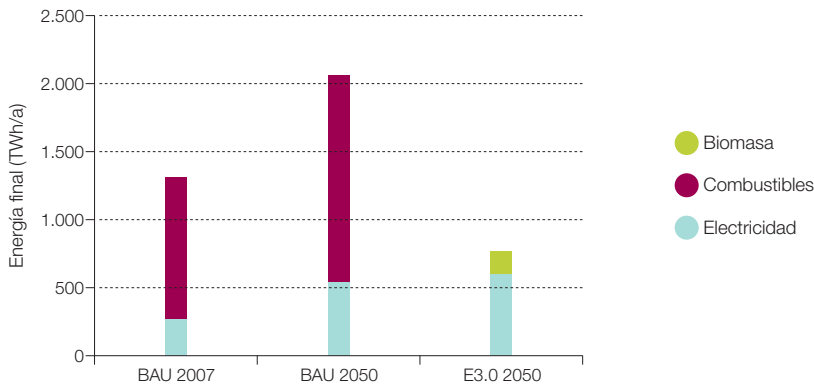
874 Incluyendo explotación monte bajo.

excesivo⁸⁷⁵, lo que conduce a unos grandes requerimientos de superficie. Este resultado confirma la impresión que arrastramos desde la realización del estudio Renovables 2050 (GP, 2005) de que la biomasa en España constituye un recurso escaso en relación con sus usos potenciales, y por tanto que es preciso reservarlo para aquellos usos que no puedan ser cubiertos con otras tecnologías renovables.

Siguiendo con los resultados del estudio Renovables 2050 (GP, 2005) relativos a la evaluación del potencial de las energías renovables, el consumo de electricidad que hemos obtenido para el contexto E3.0 constituye un 2% del potencial de generación de electricidad a partir de todas las tecnologías renovables (incluso excluyendo la biomasa). En estas condiciones, el emplear un 87% del potencial de la biomasa para cubrir la demanda de combustibles parece totalmente desproporcionado en relación a la disponibilidad de los distintos recursos renovables.

Por estos motivos, consideramos que tiene más sentido cubrir toda o parte de la demanda de combustibles mediante hidrógeno producido⁸⁷⁶ a partir de electricidad generada con otras fuentes renovables, a pesar de la penalización energética asociada a la generación y procesado del hidrógeno. Para explorar esta situación, en la figura 536 recogemos el caso extremo de emplear hidrógeno para cubrir el total de la demanda de combustibles en el contexto E3.0, excepto la cantidad de biomasa ya asignada al sector industria y la demanda del sector de usos no energéticos, que cubrimos con biocombustibles. La demanda de electricidad en el contexto E3.0 asciende en este caso a un 3,9% del recurso de electricidad renovable (excluyendo la biomasa), por lo que desde el punto de vista del recurso esta estrategia no resulta problemática. Sin embargo, en estas condiciones el consumo de electricidad en el contexto E3.0 pasa a ser un 222% del existente en el año 2007, por lo que la implementación de esta estrategia exigiría incrementar significativamente la

Figura 536. Consumo de energía si para el contexto E3.0 empleamos hidrógeno para cubrir la demanda de combustibles fuera del sector industria. La biomasa indicada en el contexto E3.0 corresponde al uso ya comprometido para el sector industria más la requerida para generar los biocombustibles que puedan cubrir la demanda del sector de usos no energéticos. Los combustibles en el contexto BAU son mayoritariamente fósiles.



875 Además es preciso tener en cuenta que la biomasa también debe participar en la regulación del sistema de generación eléctrica.

876 Hemos considerado un rendimiento del 49% para la producción y distribución de hidrógeno a partir de electricidad de origen renovable, como promedio de los rendimientos asociados al uso de hidrógeno gaseoso y líquido.

infraestructura de generación eléctrica y la infraestructura de transporte y distribución, o bien eléctrica o bien de hidrógeno, con sus potenciales impactos ambientales.

En este contexto recomendamos una aproximación mixta en la que se establezca un objetivo en relación al potencial de biomasa a explotar para la cobertura de la demanda de combustibles, y que el resto se cubra vía hidrógeno, con una estrategia tal que se minimice⁸⁷⁷ el requerimiento de expansión del sistema de transporte y distribución eléctrica. En el punto siguiente presentamos las implicaciones de una primera aproximación a este planteamiento.

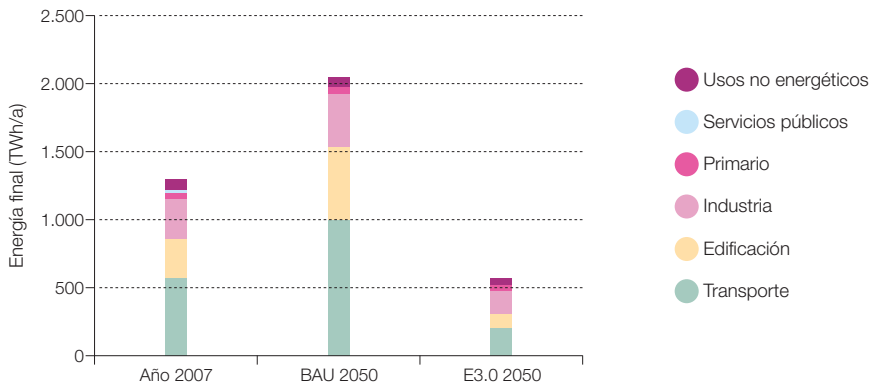
Por lo que respecta al reparto sectorial, la figura 537 reproduce los resultados en términos de consumo de energía final con el desglose sectorial. Respecto a esta figura merece la pena hacer varios comentarios:

- Por lo que respecta al sector transporte, es preciso recordar que los resultados presentados reproducen consumos superiores a los que aparecen en los balances habituales

por incorporar la mitad de la repercusión asociada al transporte internacional.

- En el contexto BAU, el sector transporte resulta con diferencia el dominante, si bien al quitar la contribución del transporte internacional, el sector edificación quedaría del mismo orden.
- En el contexto E3.0 el gran despliegue de medidas de eficiencia en los sectores edificación y transporte hacen que el sector industrial, en el que existe un menor potencial de despliegue de medidas de eficiencia adicionales a las ya incorporadas en el contexto BAU, pasa a constituir uno de los sectores dominantes en la estructura de consumo energético.

Figura 537. Desglose sectorial del consumo de energía final en el año 2007 y en 2050 con los contextos BAU y E3.0.



⁸⁷⁷ Por ejemplo mediante la producción de hidrógeno en los mismos emplazamientos donde se encuentra localizada la generación eléctrica, y teniendo la precaución de no disparar los requerimientos de transporte de hidrógeno ubicando los puntos de generación cerca de los puntos de consumo.

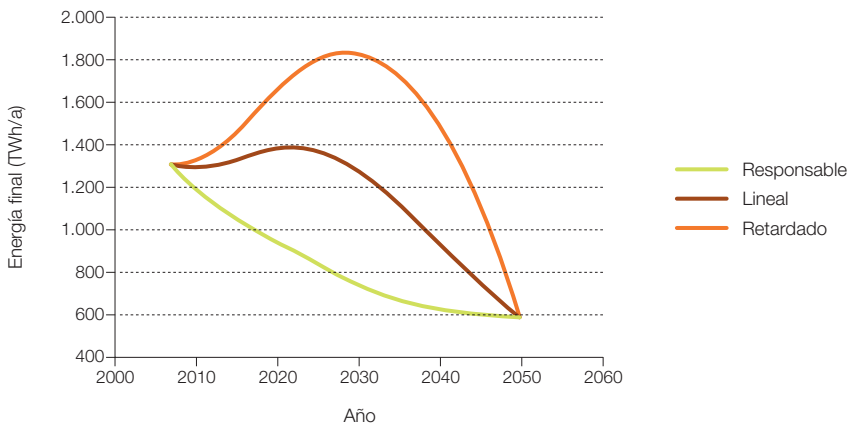
Para terminar, en la figura 538 recogemos los tres escenarios de transición del contexto BAU al E3.0 considerados en este informe para ilustrar las posibles trayectorias de evolución de la demanda del total de sectores energéticos. Como podemos observar, se confirman las conclusiones que ya íbamos incluyendo en la elaboración de los escenarios sectoriales:

- El escenario retardado produce un gran pico interior del consumo en torno al año 2030 que nos obligaría a un gran sobredimensionado de las infraestructuras energéticas respecto a las necesidades existentes una vez completada la transición. Estas infraestructuras energéticas sobredimensionadas no podrían por tanto llegar a amortizarse, y más allá del coste incremental que suponen, podrían introducir resistencia a completar la transición hacia el contexto E3.0 con el argumento de necesitar amortizar las inversiones realizadas. Esta situación ya la estamos viviendo ahora en España en relación al despliegue de la generación con energías

renovables, siendo el motivo unas inversiones excesivas, y realizadas fuera de tiempo por carencia de planificación energética, en centrales de ciclo combinado operando con gas natural.

- Por otro lado, el escenario retardado exigiría unas tasas de reducción de consumo muy elevadas durante los últimos 20 años del escenario temporal considerado. Las tasas de cambio, más que el cambio en sí, son las que conducen a encarecer y dificultar el proceso de transición, por lo que la evolución a lo largo del escenario retardado resultaría, con diferencia, la más cara, además de ofrecer unas posibilidades muy elevadas de que no se consiguiera materializar la transición para el año 2050.

Figura 538. Distintos escenarios de transición del contexto BAU al E3.0 para el conjunto de los sectores energéticos.



3.10.1 Producción de combustibles en el contexto E3.0

Como comentábamos en el apartado anterior, en el contexto E3.0 para el año 2050 se requieren 144 TWh/a de combustibles para complementar la demanda de energía final de todos los sectores energéticos, existiendo dos posibilidades para producir estos combustibles basados en energías renovables: biocombustibles procedentes de la biomasa e hidrógeno procedente de electricidad de origen renovable.

Cada una de estas opciones, por sí sola presenta inconvenientes:

- La biomasa requeriría una cantidad total superior al recurso disponible de las clases de biomasa que querríamos explotar, lo que conduce además a una gran ocupación del territorio peninsular. Hay que tener en cuenta que el uso de biomasa ya comprometido en el contexto E3.0, para el sector industria y para el sector de usos no energéticos ya exige el uso de 156 TWh/a de biomasa, empleando para ello un 8,5% de la superficie del territorio peninsular.
- La producción de hidrógeno con electricidad renovable requeriría una generación de electricidad total superior al doble de la actual, lo cual implicaría un considerable crecimiento de las infraestructuras eléctricas con su correspondiente impacto ambiental.

En estas condiciones planteábamos que lo apropiado sería buscar una aproximación mixta entre estas dos opciones. La determinación del reparto óptimo se escapa del alcance de este trabajo, y requeriría un estudio específico para contrapesar los aspectos positivos y negativos de cada opción. Sin

embargo, con el fin de cuantificar las implicaciones de un planteamiento de este estilo, en este punto vamos a desarrollar una primera aproximación basada en el siguiente criterio:

- Emplear la misma extensión del territorio peninsular para producir combustibles con la biomasa que la que se dedica a producir hidrógeno para ser empleado como combustible.

Para el caso de la biomasa limitaremos⁸⁷⁸ los tipos a emplear a los cultivos energéticos (incluyendo los cultivos forestales de rotación rápida)⁸⁷⁹, por ser los de mayor densidad energética por unidad de área, y por ajustarse a los criterios de sostenibilidad en relación al ciclo del carbono⁸⁸⁰ y el uso del territorio⁸⁸¹.

Los requerimientos de superficie para producir la energía primaria⁸⁸² (electricidad o biomasa) que emplearemos para confeccionar los combustibles (biocombustibles o hidrógeno) varían enormemente entre las tecnologías empleadas. La figura 539 nos muestra los resultados considerando para las categorías de generación de electricidad el valor medio de todo el potencial disponible. Como podemos ver, la biomasa requiere el uso de una superficie muy superior, aunque su rendimiento para la producción de biocombustibles es superior al de producción de hidrógeno con electricidad. Es más, en la figura hemos representado los valores promedios asociados al potencial total, pero las mejores categorías de cada tecnología, con un potencial superior a la cantidad total de potencia a instalar requerida, tienen densidades de área considerablemente inferiores a las presentadas en la figura.

⁸⁷⁸ Debemos resaltar aquí que el uso de biomasa acuática (algas) no fue incluido en la evaluación del potencial en (GP,2005), motivo por el cual tampoco lo consideramos aquí. Sin embargo, esta opción, al igual que algunas tecnologías renovables para generación de electricidad, tiene la ventaja de que no requiere el uso de superficie del territorio.

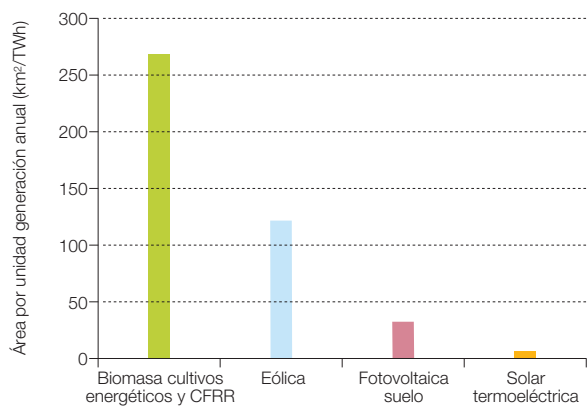
⁸⁷⁹ En el contexto de los potenciales determinados en (GP, 2005), en los que estos cultivos se desarrollaban en tierras que no tenían asignado otro uso anterior.

⁸⁸⁰ Ver consideraciones sobre el uso de biomasa en el capítulo dedicado al sector edificación.

⁸⁸¹ En este sentido, la otra categoría de biomasa no residual que incluíamos en la evaluación del techo de recurso disponible en (GP, 2005), el aprovechamiento del monte bajo, la hemos descartado por no ser tan favorable desde el punto de vista del ciclo del carbono, y por servir de zona de amortiguamiento a los espacios naturales protegidos. Además tiene un requerimiento de superficie por unidad de energía superior a tres veces el de las categorías de biomasa consideradas.

⁸⁸² En este apartado, y dado que estamos limitados al contexto E3.0 y focalizando nuestra atención en la producción de combustibles como energía final, nos referiremos a la electricidad procedente de fuentes renovables (distintas de la biomasa) como energía primaria.

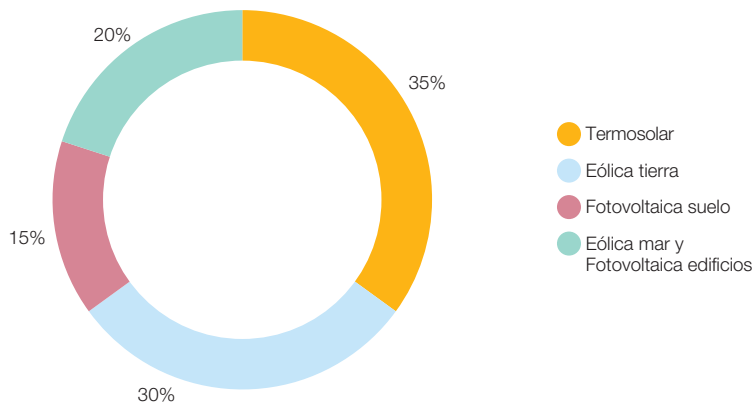
Figura 539. Requerimientos de superficie para generar la energía primaria empleada en la producción de combustibles en el contexto E3.0 (biomasa y electricidad). Para todos los casos se ha considerado el valor promedio del potencial total disponible.



Por lo que respecta a los requerimientos de superficie para transporte y distribución de electricidad a repercutir sobre el requerimiento de superficie para la generación de hidrógeno, adoptaremos las siguientes consideraciones:

- Ancho de líneas correspondiente a lo reflejado en (GP, 2009) para HVAC a 800 kV.
- Longitud media⁸⁸³ del transporte de electricidad para producción de hidrógeno de 150 km.
- Factor de capacidad de las líneas en relación a la potencia instalada del 40%⁸⁸⁴.
- Un requerimiento de superficie para distribución del 30% del de transporte.

Figura 540. Estructura del sistema de generación de electricidad dedicado a la producción de hidrógeno, en términos de electricidad generada.



⁸⁸³ El objetivo debería ser el minimizar estas distancias disponiendo los centros de producción de hidrógeno cercanos a los de generación eléctrica.

⁸⁸⁴ Estas líneas no estarían dedicadas tan solo a la producción de hidrógeno, sino que estarían integradas en el resto del sistema eléctrico.

Por lo que respecta al mix de generación dedicado a la producción de hidrógeno, supondremos que tiene la estructura reproducida en la figura 540, donde podemos ver que hay una cierta participación de dos tecnologías sin requerimiento de superficie de territorio⁸⁸⁵ (eólica marina y fotovoltaica integrada en los edificios).

En estas condiciones, el criterio de reparto entre biocombustibles e hidrógeno adoptado (igualdad de áreas), nos conduce al reparto entre ocupación de superficie, producción de energía primaria (biomasa y electricidad), y producción de combustibles⁸⁸⁶ que reproducimos en las figuras 541 a 543.

Figura 541. Reparto de los requerimientos de superficie para producir los combustibles necesarios en el contexto E3.0.

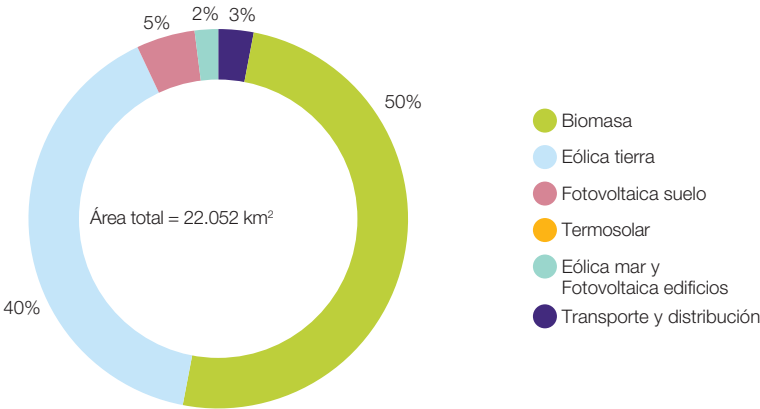
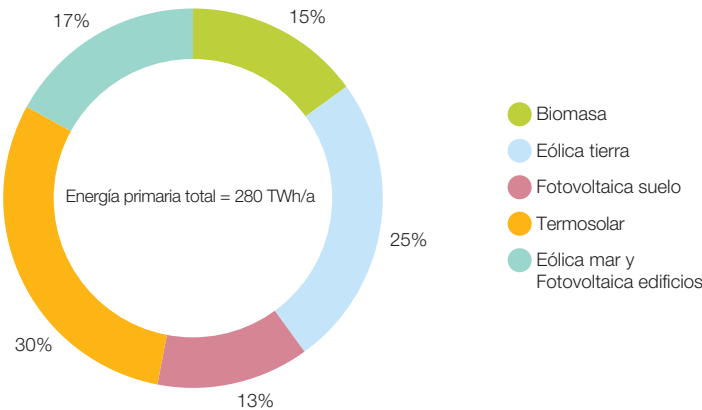


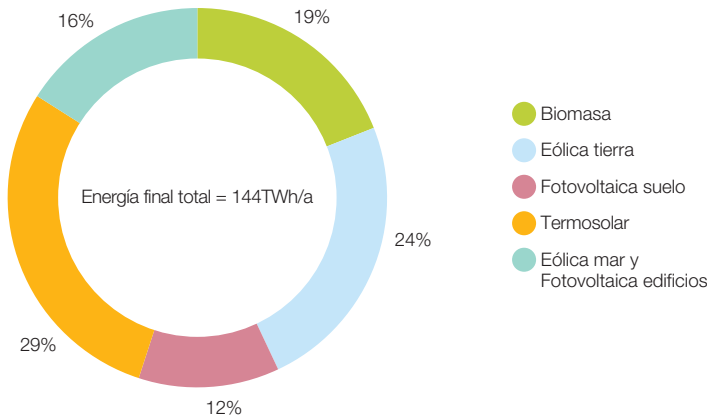
Figura 542. Reparto de la energía primaria empleada para producir los combustibles necesarios en el contexto E3.0. Recordamos que por primaria nos referimos en este apartado a la biomasa empleada para producir los biocombustibles, y a la electricidad empleada para producir el hidrógeno.



⁸⁸⁵ Desde el punto de vista del análisis aquí desarrollado resulta irrelevante el reparto entre estas dos tecnologías, pues no consumen superficie del territorio peninsular.

⁸⁸⁶ Recordamos que en este apartado nos estamos refiriendo a energía final como la correspondiente a los combustibles producidos. Y estos combustibles se dividen entre biocombustibles (cuando proceden del procesamiento de la biomasa primaria), e hidrógeno obtenido a partir de electricidad de origen renovable.

Figura 543. Reparto de la energía final en los combustibles necesarios para el contexto E3.0. En el caso de la biomasa el combustible reflejado en esta figura es el biocombustible obtenido a partir de ella, y para el resto de tecnologías el combustible reflejado en estas figuras es el hidrógeno obtenido a partir de la electricidad por ellas producida.



En estas condiciones, el área dedicada a la producción de biomasa para fabricar biocombustibles alcanza un valor de 11026 km² (2,2% del territorio peninsular), que al unirlo al área requerida para producir la biomasa empleada en los sectores industria y usos no energéticos, asciende a 53101 km² (10,8% del territorio peninsular), lo cual implica emplear en total 197 TWh/a de biomasa, que constituye un 89% del potencial disponible⁸⁸⁷.

La cantidad de recurso de biomasa finalmente empleado resulta elevado en términos relativos al potencial disponible, lo cual podría aconsejar incrementar la producción de hidrógeno más allá del valor resultante al criterio de reparto implementado en este punto para sustituir a parte de la biomasa. En efecto, como comentábamos anteriormente, existe una infinidad de opciones para cubrir la parte de la demanda energética no electrificada. En este punto hemos expuesto los resultados de una de estas posibilidades, basados en un criterio de igualdad de área dedicada para la

producción de combustibles, que en aras al mayor rendimiento energético de los procesos de conversión, hace un uso extensivo del recurso de biomasa, si bien limitado a la explotación de la fracción⁸⁸⁸ del potencial disponible con menor impacto en el ciclo del carbono. Sin embargo existen muchas más opciones al sustituir total o parcialmente el uso de biomasa por hidrógeno en los distintos sectores energéticos, incluyendo el industrial en el que priorizamos⁸⁸⁹ el uso de la biomasa sin considerar la posible participación del hidrógeno. Otros argumentos como los asociados a costes e impacto ambiental pueden desplazar el balance entre biomasa e hidrógeno hacia otro reparto, pero indicábamos anteriormente, el análisis del impacto de estas otras variables en el reparto óptimo queda fuera del alcance de este trabajo.

⁸⁸⁷ En el caso de limitar el potencial disponible a los cultivos energéticos y cultivos forestales de rotación rápida: 221 TWh/a.

⁸⁸⁸ Efectivamente, hemos acotado el recurso de biomasa a implementar en los 221 TWh/a correspondientes a los cultivos energéticos y cultivos forestales de rotación rápida, de los cuales requerimos movilizar 197 TWh/a. Frente al recurso total de biomasa en la España peninsular evaluado en (GP, 2005), 426 TWh/a, movilizamos un 46%.

⁸⁸⁹ El argumento fundamental es que precisamente en el sector industrial es donde el uso directo de la biomasa, sin requerir su conversión a biocombustible, resulta más eficiente.

3.11 Escenarios de emisiones

En este punto vamos a desarrollar escenarios de evolución de las emisiones de CO₂ asociados a los escenarios energéticos anteriormente presentados para disponer de una estimación de su impacto sobre el sistema climático.

3.11.1 Caracterización condiciones de partida

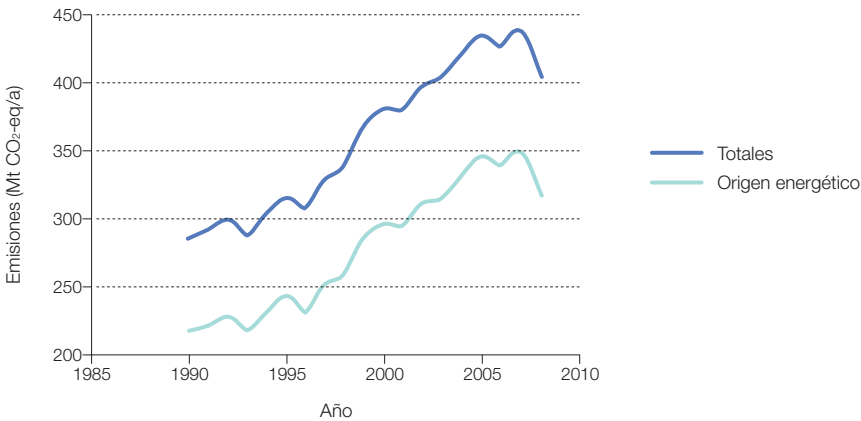
Si en términos de consumo de energía tenemos una incertidumbre significativa en la caracterización de la estructura del sistema energético, al considerar las emisiones asociadas al consumo de energía las incertidumbres se amplifican de forma importante.

En este punto recopilamos la información disponible para caracterizar el punto de partida, de cuyo análisis extraeremos información para proyectar el escenario de evolución hasta el año 2050.

En la figura 544 recogemos la evolución de las emisiones anuales de GEI, totales y de origen energético. En esta figura podemos observar tanto la tendencia general⁸⁹⁰ creciente, como el dominio de las emisiones de origen energético sobre las totales, tanto a nivel de emisiones absolutas como a nivel de las tendencias temporales experimentadas.

Un parámetro importante para la caracterización de la estructura de emisiones de origen energético es el coeficiente de emisiones por unidad de energía. En la figura 545 recogemos la evolución histórica de este coeficiente para el conjunto del sistema energético basado en los datos de Eurostat, y referido al consumo de energía final. Como podemos observar, este coeficiente, a pesar de las importantes oscilaciones interanuales que experimenta, presenta una clara tendencia media decreciente desde el año 1999, con una gran tasa de reducción en el año 2008 a pesar de la reducción en el consumo de energía final⁸⁹¹. Estas fechas corresponden respectivamente al año posterior a la publicación de los reales decretos que establecieron las condiciones adecuadas para el

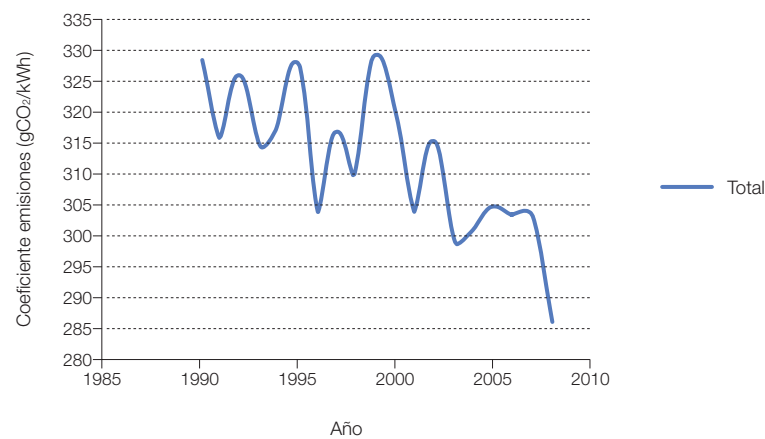
Figura 544. Evolución de las emisiones anuales de CO₂-eq, totales y de origen energético. Procesado a partir de datos Eurostat.



⁸⁹⁰ En el año 2008 se invirtió esta tendencia, principalmente como consecuencia de las condiciones de crisis, pero de seguir en un contexto BAU probablemente en los años siguientes volveremos a recuperar la tendencia creciente.

⁸⁹¹ El consumo de energía final constituye el denominador del coeficiente de emisiones, por lo que la reducción de consumo experimentada en el año 2008 podría haber conducido a un incremento del coeficiente de emisiones de no haber sido por el hecho de que las emisiones experimentaron una reducción mayor que el consumo de energía.

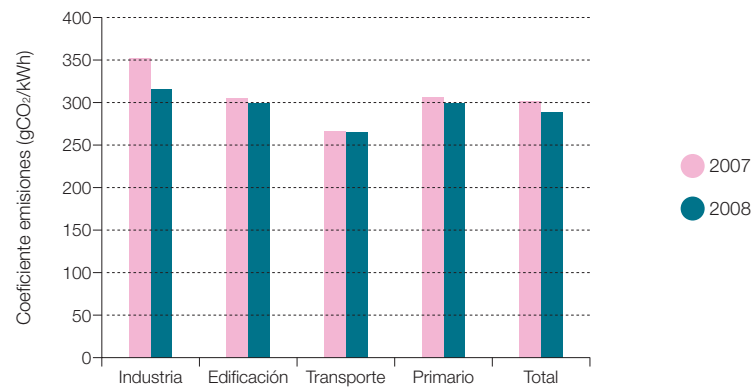
Figura 545. Evolución del coeficiente de emisiones del conjunto del sistema energético. Procesado a partir de datos Eurostat.



despegue de algunas tecnologías renovables dentro del sistema eléctrico (RD 2818/1998 y RD 661/2007) y, en efecto, la gran reducción del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico experimentada en este periodo se encuentra detrás de esta caída del coeficiente de emisiones del sistema energético total⁸⁹².

La responsabilidad de cada sector sobre el coeficiente de emisiones total del sistema energético no es homogénea. En la figura 546 podemos ver los coeficientes de emisiones sectoriales en los años 2007 y 2008 procesados a partir de los datos presentados en (Díaz Carazo, J., et al, 2009).

Figura 546. Coeficientes de emisiones sectoriales en 2007 y 2008. Procesado a partir de datos (Díaz Carazo, J., et al, 2009).



⁸⁹² Y por el mismo motivo cabe esperar una atenuación de estas tasas de decrecimiento del coeficiente de emisiones en los próximos años, como consecuencia directa del entorno más desfavorable y de la inseguridad regulatoria que empezaron a desplegarse con el RD 1578/2008.

La divergencia entre las distintas fuentes es considerable, a pesar de que la fuente primaria de datos debería ser la misma. En la figura 547 podemos ver los coeficientes de emisiones del conjunto del sistema energético, relativos al consumo de energía final, procesados a partir de los datos de los balances de la AIE⁸⁹³, de Eurostat, y de OESE (Díaz Carazo J., et al., 2009). Para el caso de los balances de la AIE presentamos los resultados al incluir o no incluir el consumo de energía final para usos no energéticos. En las otras referencias no aparece diferenciado este componente de consumo de energía final. Como podemos observar las discrepancias son significativas⁸⁹⁴. A la incertidumbre que proporciona esta situación hay que añadirle la incertidumbre en relación a las emisiones reales debida al hecho de que las emisiones no se miden de forma directa sino que se elaboran a partir de otros indicadores.

Por lo que respecta al sistema eléctrico, la introducción de energías renovables incentivada por los Reales Decretos RD 2818/1998

y RD 661/2007 ha conducido a una rápida reducción del coeficiente de emisiones durante los últimos años. En la figura 548 mostramos los resultados recogidos por el Observatorio de la Electricidad de WWF para el sistema eléctrico peninsular⁸⁹⁵.

Sin embargo, la primera referencia oficial del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico no apareció hasta el año 2008 en que la CNE empezó a procesar y publicar esta información con motivo del sistema de etiquetado y garantías de origen de la electricidad. Desde el año 2007 y hasta la fecha de redacción de este informe (11/2010), también existe otra referencia oficial indirecta del coeficiente de emisiones de la electricidad, que es la establecida en el programa oficial de calificación energética de edificios CALENER. En efecto, la calificación energética de edificios impone un coeficiente de emisiones de la electricidad de 649 g CO₂/kWh_e para el sistema eléctrico peninsular⁸⁹⁶, en términos de electricidad consumida, que es el coeficiente por el que multiplica el consumo de

Figura 547. Coeficiente de emisiones del sistema energético total, referido al consumo de energía final, procesado a partir de los datos en AIE, Eurostat, y OESE (Díaz Carazo, J., et al., 2009).



893 A diferencia del resto del informe en que el último balance de la AIE que estaba disponible era el del año 2007, añadimos aquí los datos del balance energético de la AIE para el año 2008, que pasó a estar disponible en el 11/2010.

894 Para el caso de los balances de la AIE también sorprende el importante crecimiento del coeficiente de emisiones del año 2007 respecto al de 2006.

895 Estos valores también muestran un coeficiente ligeramente menor en el año 2006 respecto al de 2007, pero sin llegar a la gran diferencia que reflejan los datos de la AIE.

896 En el caso de los sistemas extra-peninsulares el coeficiente de emisiones de CALENER es de 981 g CO₂/kWh_e.

electricidad de los edificios para deducir sus emisiones. En la figura 549 reproducimos estos valores oficiales⁸⁹⁷ del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico. Como podemos observar, las discrepancias son muy importantes.

Por último, de cara a extraer más información sobre la estructura sectorial de los coeficientes de emisiones, y dado que no disponemos de referencias oficiales fiables del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico para los

Figura 548. Evolución del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico peninsular, referido a la producción de electricidad, según el Observatorio de la Electricidad de WWF. El valor del año 2010 es la media de los meses de enero a octubre al no estar disponibles noviembre y diciembre al redactar este informe (11/2010).

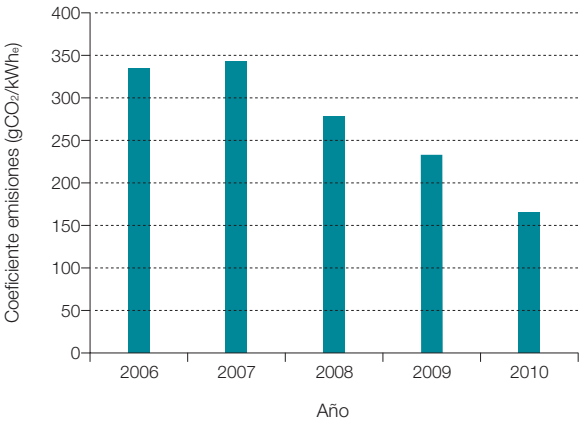
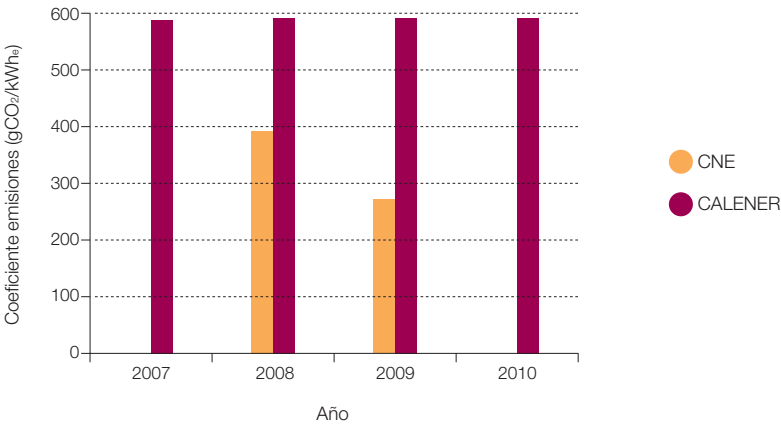


Figura 549. Coeficiente de emisiones del sistema eléctrico nacional, referido a la producción de electricidad, según CNE y CALENER.



897 Para el caso del coeficiente de emisiones del CALENER, para poder compararlo en los mismos términos que los coeficientes de la CNE, lo hemos procesado para convertirlo al promedio nacional (empleando el ratio de demandas que figura en los informes anuales de REE), y para expresarlo en términos de la producción de electricidad mediante el rendimiento que proporcionan los balances energéticos de la AIE.

años anteriores al 2008, hemos procedido a evaluar las emisiones sectoriales que se desprenden de los consumos de energía final de los balances de la AIE mediante unos coeficientes de emisiones para cada tipo de energía final, calibrando el resultado con las emisiones totales que figuran en los balances de la AIE. En la figura 550 mostramos

los coeficientes de emisión que como promedio⁸⁹⁸ hemos empleado para cada tipo de energía final que aparece en los balances de la AIE, junto con los correspondientes coeficientes de emisiones que resultan para el sistema eléctrico al calibrar con las emisiones totales que figuran en los balances de la AIE. Como podemos observar los resultados

Figura 550. Coeficientes de emisiones de los distintos tipos de energía final que aparecen en los balances de la AIE. El coeficiente para la electricidad, referido a la producción de electricidad, se ha obtenido calibrando los resultados con las emisiones totales.

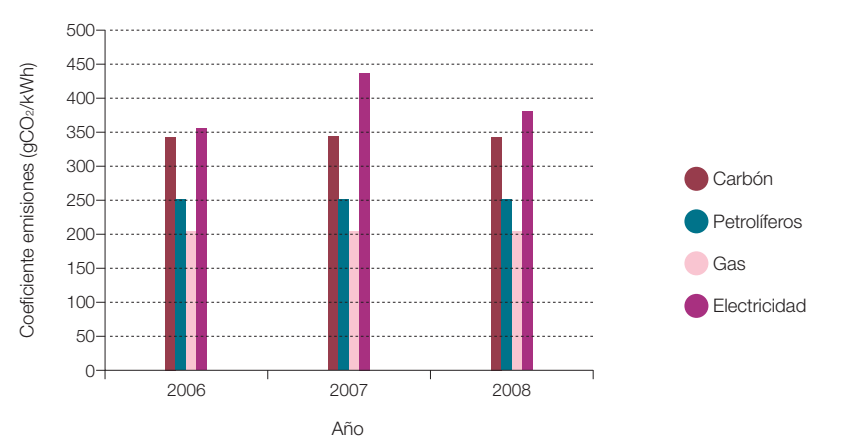
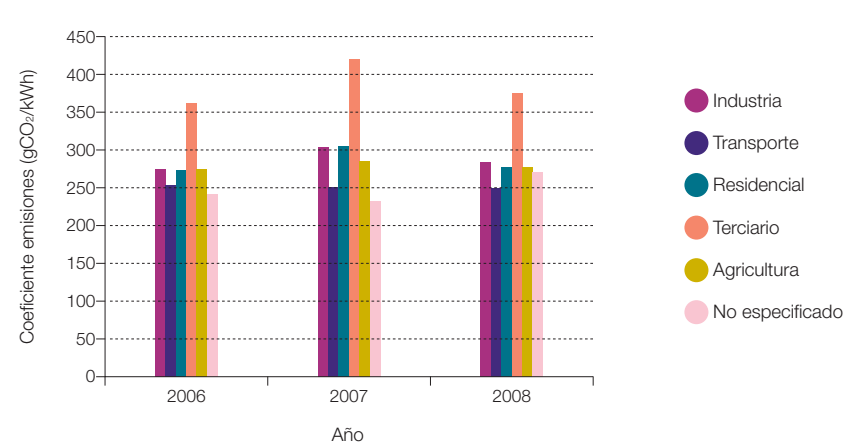


Figura 551. Coeficientes de emisiones sectoriales asociados a los balances de la AIE.



⁸⁹⁸ Debe tenerse en cuenta que tanto para el carbón como para los productos petrolíferos, los coeficientes de emisiones varían entre los distintos productos empleados, pero al no aparecer esta descomposición en los balances de la AIE, hemos procedido a emplear unos valores medios.

obtenidos para el año 2008 concuerdan bien con el coeficiente de emisiones de la CNE⁸⁹⁹.

A partir de estos resultados, podemos generar los coeficientes de emisiones sectoriales asociados a los balances de la AIE, que reproducimos en la figura 551. Como podemos observar, el sector edificación terciario destaca sobre los otros sectores por su mayor coeficiente de emisiones, aspecto que está relacionado con el elevado porcentaje de electricidad en la estructura de consumo final de este sector y que, por tanto, se va atenuando al reducir el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico.

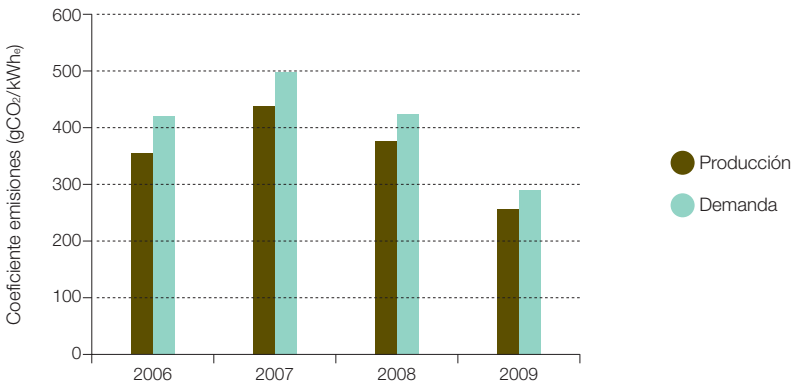
3.11.2 Escenarios de transición

En este punto desarrollamos escenarios de evolución de las emisiones del contexto BAU para poder traducir los resultados energéticos de los distintos escenarios de transición a las emisiones que llevan asociadas.

Dadas las incertidumbres en los coeficientes de emisión sectoriales, vamos a desarrollar el escenario del contexto BAU basado en una proyección del coeficiente de emisiones total agregado del sistema energético. Por lo que respecta a la tecnología E3.0 su coeficiente de emisiones es nulo, por lo que no requiere del desarrollo de escenarios adicionales.

El primer paso para desarrollar el escenario del coeficiente de emisiones en el contexto BAU consiste en estimar la evolución del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico para ese contexto. Partiendo de los coeficientes de emisiones oficiales de la CNE para los años 2008 y 2009, adaptándolos para pasar a valores peninsulares basado en los resultados recogidos en el Observatorio de la Electricidad de WWF, completándolos con los valores obtenidos del calibrado de la información disponible en los balances de la AIE, y empleando los rendimientos totales del sistema eléctrico reflejados en los balances de la AIE, obtenemos los resultados reflejados en la figura 552, que nos presenta la evolución

Figura 552. Evolución histórica reciente del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, referido tanto a la demanda final de electricidad como a la producción de electricidad.



899 El gran incremento en el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico al pasar del año 2006 al 2007 es un reflejo de la evolución del coeficiente de emisiones total según los balances de la AIE, pero a juzgar por las otras referencias parece estar más asociado a un error en los datos reflejados por este balance, y en cualquier caso constituye una clara indicación del elevado nivel de incertidumbre que envuelve a los datos de emisiones.

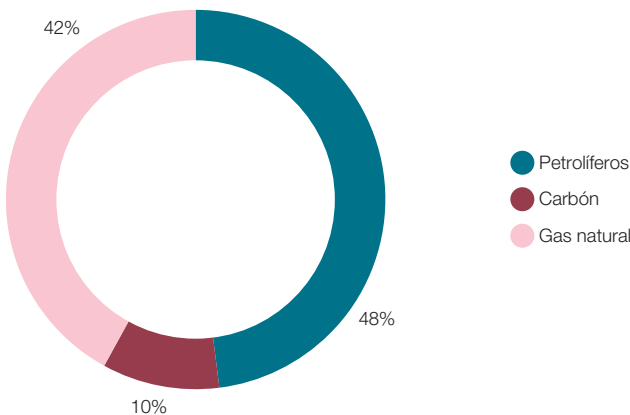
del coeficiente de emisiones del sistema eléctrico, referido tanto a la demanda final como a la producción de electricidad en los últimos años. Las grandes reducciones experimentadas por el coeficiente de emisiones desde 2007 a 2009 son un reflejo del éxito del despegue de algunas tecnologías renovables en nuestro país, y corresponden más al inicio de la transición hacia el contexto E3.0 mediante un escenario responsable, que a la realidad BAU actual, en la que la carencia de inteligencia en los sectores político y administrativo nos ha puesto de manifiesto cómo de rápido es capaz de trancar el inicio de la transición responsable hacia el contexto E3.0. Por tanto, para el escenario BAU de evolución del coeficiente de emisiones supondremos que de esos 289 g CO₂/kWh_e del año 2009⁹⁰⁰, y gracias a las inercias asociadas a nuestra breve incursión en el escenario de transición responsable, el coeficiente de emisiones del sistema eléctrico evolucionará

hasta 235 g CO₂/kWh_e en el año 2050 para el contexto BAU.⁹⁰¹

Por lo que respecta a la estructura del consumo de combustibles fósiles en el contexto BAU para el año 2050, vamos a adoptar la correspondiente al escenario de referencia del estudio [R]E para OCDE Europa (GP,2010), que reproducimos en la figura 553.

En estas condiciones, las emisiones BAU en 2050 para el conjunto del sistema energético peninsular ascenderían a 493 MtCO₂/a, con un coeficiente de emisiones total de 239 g CO₂/kWh inferior al coeficiente de emisiones del año 2007 (302 g CO₂/kWh). Por lo que respecta al escenario de evolución de este coeficiente de emisiones del conjunto del sistema energético en el contexto BAU, supondremos que durante los primeros años, y debido a las inercias de la etapa anterior de apoyo decidido al despliegue de las

Figura 553. Estructura del consumo de combustibles fósiles en el contexto BAU para 2050.



900 Referido al sistema peninsular y en términos del consumo final de electricidad.

901 Realmente hay muchas incertidumbres asociadas a esta evolución, tanto por el despliegue de las renovables en el contexto BAU, como por las mejoras de rendimiento en las tecnologías fósiles, y por la evolución del mix de generación. Si consideramos como indicativo del desarrollo BAU la referencia oficial más reciente al redactar este informe (11/2010) el mix energético propuesto por la Subcomisión del Congreso para el Análisis de la Estrategia Energética para los próximos 25 años, el coeficiente de emisiones en el año 2020, referido al sistema peninsular y a la demanda de energía final, y sin considerar evolución tecnológica significativa en las tecnologías fósiles, sería del orden de los 253 g CO₂/kWh_e, y puede bajar hasta unos 245 g CO₂/kWh_e si consideramos mejoras tecnológicas en las tecnologías fósiles. En estas condiciones, adoptar para el BAU en 2050 un coeficiente de emisiones de 235 g CO₂/kWh_e, parece adecuado.

Figura 554. Escenario de evolución del coeficiente de emisiones total del sistema energético en el contexto BAU.

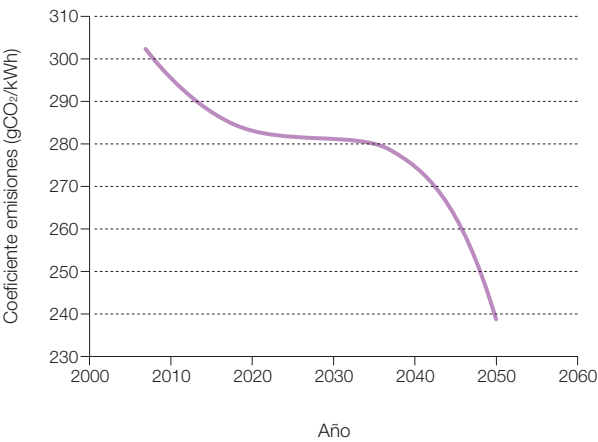
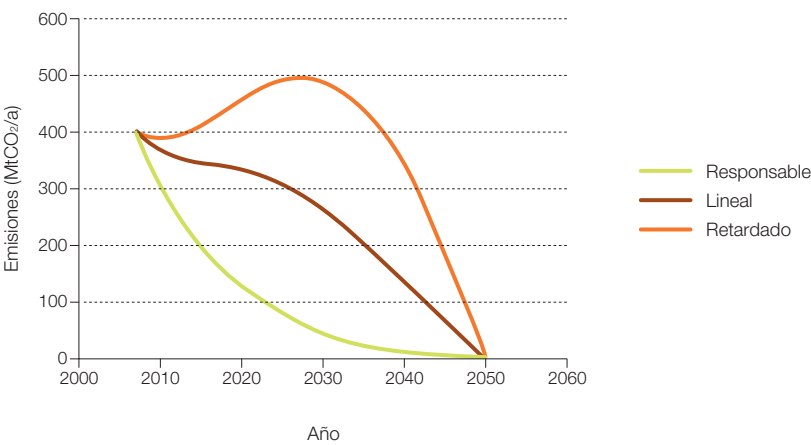


Figura 555. Evolución de las emisiones de CO2 del sistema energético peninsular asociadas a los tres escenarios de transición considerados.



renovables en el sistema eléctrico, mantiene una tendencia decreciente, aunque con ratios de reducción cada vez menores, hasta llegar a estancarse⁹⁰² en torno al año 2020, y permanecer estancado hasta el año 2040 en el que se consigan revertir los efectos negativos para el despliegue de las renovables ocasionados por los planteamientos de los sistemas político y administrativo hasta el año 2010.

En estas condiciones, la evolución de las emisiones asociadas al sistema energético peninsular en los tres escenarios de transición desde el contexto BAU al E3.0 que hemos considerado, serían las que aparecen reflejadas⁹⁰³ en la figura 555. Como podemos observar al comparar esta figura con la correspondiente a la evolución de la demanda de energía en los tres escenarios de transición, la transición al contexto E3.0 resulta incluso más beneficiosa desde el punto de vista de las emisiones de lo que ya resultaba en términos de energía gracias al coeficiente de emisiones nulo de la tecnología E3.0, atenuando el máximo de emisiones en el escenario de transición retardado e incluso eliminándolo en el lineal, y proporcionando elevadas tasas de reducción en el escenario responsable.

902 Con la actitud actual del sistema político, incluso habría argumentos para proyectar un periodo con tasas crecientes del coeficiente de emisiones, pero de forma conservadora vamos a limitarnos a proyectar un periodo de estancamiento.

903 Para el año de partida (2007), las emisiones resultantes son de 397 MtCO₂/a, superiores a las 348 MtCO₂/a recogidas en Eurostat. El motivo de esta divergencia es que los resultados de los escenarios aquí desarrollados incorporan la valoración de la mitad del transporte internacional.





imagen

La lámpara de mesa Sunnan de Ikea no consume electricidad. Incluye un panel solar extraíble cuyo tiempo de recarga es de nueve a doce horas en un día de sol. A plena carga de batería emite luz a toda potencia durante tres horas aproximadamente.

© IKEA

Costes

4

4.1 Introducción

En este capítulo vamos a recopilar y desarrollar escenarios de costes de los distintos componentes del sistema energético, tanto en el contexto BAU como en el E3.0, en los que posteriormente nos apoyaremos para evaluar el coste total del suministro de energía en los contextos BAU y E3.0, bajo distintos casos de cobertura de la demanda.

Los indicadores principales que hemos adoptado en este estudio, para describir el desempeño del sistema energético, son el coste absoluto total del suministro de energía y el coste específico total por unidad de energía final suministrada. Por tanto, estos indicadores principales contarán con contribuciones de distintos elementos (electricidad, combustibles fósiles, hidrógeno, etc.) que adquirirán distintos pesos específicos para cada una de las combinaciones entre contexto de demanda y sistema empleado para su cobertura.

Habitualmente los costes de la energía se nos presentan en unidades totalmente distintas⁹⁰⁴ que impiden que podamos realizar una comparación directa entre los costes de las distintas formas de energía. Nosotros vamos a proceder a expresar todos los costes de las distintas formas de energía en las mismas unidades (c€/kWh), con la finalidad de poder disponer en todo momento de una comparación directa y clara sobre los costes relativos de unas formas de energía respecto a otras⁹⁰⁵, así como de disponer de una información más intuitiva del efecto que cabe esperar que tenga la participación de esta forma de energía en la cobertura de la demanda, sobre el coste específico del conjunto del sistema energético, que es el indicador que hemos adoptado para describir el desempeño de los distintos casos analizados.

Por otro lado, desde el punto de vista de la comparación, los costes de las distintas formas de energía deberían incorporar la valoración económica de todas sus externalidades, pues de lo contrario falsean la comparativa al dejarse fuera del contexto de la comparación unos costes adicionales que deberá pagar la sociedad, pudiendo la comparación de estructuras de costes imperfectas conducir a unas conclusiones totalmente erróneas. En la medida de lo posible incorporaremos en los escenarios de costes una valoración de las externalidades, y en este aspecto consideramos que hemos sido conservadores, por tener el convencimiento de que la gran mayoría de las externalidades se encuentran fuertemente infravaloradas⁹⁰⁶.

Los resultados de costes se presentan a lo largo de todo el informe en términos de euros constantes del año 2007. Puesto que las referencias de partida para elaborar los escenarios presentan los resultados económicos en términos de dinero corriente, o constante, referido a otra base, e incluso a menudo en otra moneda (normalmente dólar), todos estos resultados se han adaptado con los tipos de cambio correspondientes a cada año, y con las series de IPCA para trasladarlos⁹⁰⁷ a la unidad seleccionada de euros constantes del año 2007 (€-2007).

4.2 Escenarios de costes

En este punto presentamos el desarrollo de escenarios de costes de las distintas fuentes de energía consideradas en los estudios de cobertura de la demanda desarrollados en este informe.

Es de resaltar que estamos bastante acostumbrados a ver escenarios de costes, especialmente de los combustibles fósiles, que

904 €/MWh, €/litro, €/baril, €/tonelada, €/GJ, €/lb-U₂O₈, etc.

905 Otro elemento a tener en cuenta de cara a poder establecer comparaciones entre los costes de las distintas formas de energía es el de incluir los mismos componentes de la estructura de costes. Así, por ejemplo, para poder comparar los costes de las energías renovables con los de los combustibles fósiles, para estos últimos habrá que considerar los costes en términos de suministro de energía final (distintos a los de importación de la materia prima), pero sin incluir las cargas impositivas.

906 Sin ir más lejos, el escenario de costes de CO₂, elaborado a partir de la tendencia del mercado actual, claramente infravalora esta externalidad al ser incapaz, por sí mismo, de potenciar el cambio del modelo energético en la dirección requerida.

907 Esto hace, por ejemplo, que los resultados del informe R100% (GP, 2007) en los que se desarrollaron los escenarios de costes de las energías renovables que vamos a emplear, al estar expresados en €-2003, no se puedan comparar directamente con los empleados en este informe, que han sido adaptados a €-2007.

de forma consistente infravaloran la inflación incremental a la que se ven sometidos estos recursos, por lo que no coinciden ni con la experiencia cotidiana del incremento de costes de estos recursos, ni con aspectos estructurales como lo que cabe esperar que le pase a un recurso escaso y limitado al verse sometido a una demanda fuertemente creciente. Es por tanto bastante habitual que de un año a otro asistamos a modificaciones al alza de estos escenarios de costes conservadores⁹⁰⁸. Por este motivo, en lugar de adoptar escenarios existentes sobre la evolución del precio de los recursos energéticos, hemos optado por desarrollar escenarios de costes en el marco de este informe que respondan a estos elementos estructurales, y que nos permitan, por tanto, extraer conclusiones de la comparación de resultados elaborados con estos escenarios. Hay que tener presente que nuestro interés consiste en comparar un escenario de cambio (E3.0) con un escenario BAU, y si seguimos en un contexto BAU extrapolando las trayectorias seguidas por los países desarrollados al conjunto del planeta, no existe otra opción que la de enfrentarnos a tasas crecientes de inflación de los recursos limitados y escasos que han soportado la evolución BAU, por mucho que prefiramos seguir mirando escenarios que predicen bajas tasas de inflación en estos recursos⁹⁰⁹.

Cabe señalar que en esta labor de desarrollo de escenarios de costes de los recursos energéticos hemos sido bastante conservadores a la hora de elaborar los escenarios de tasas de inflación incremental, optando por escenarios bastante más moderados de lo que creemos que puede llegar a ser el futuro próximo si el conjunto del planeta se queda estancado en el contexto BAU. Por tanto, la hipótesis implícita es que incluso en el contexto BAU parte del planeta⁹¹⁰ evolucionará hacia el contexto E3.0, y atenuará la inflación incremental que

cabría esperar en los recursos energéticos del contexto BAU, si el conjunto de la población del planeta evolucionara por la senda BAU.

4.2.1 Energías renovables

Los costes correspondientes a las energías renovables que hemos empleado en este estudio son los que se desarrollaron en el estudio R100% (GP, 2007). En esta referencia, si partimos de los costes correspondientes al inicio del periodo de análisis (que era el año 2003), se desarrollaron curvas de aprendizaje para las distintas tecnologías consideradas, que generaron una evolución de costes en el periodo considerado (2003-2050). Sin embargo, para este estudio el inicio del periodo de análisis ha pasado de 2003 al 2007, motivo por el cual los costes correspondientes al inicio son inferiores (debido a la evolución por las curvas de aprendizaje), y adicionalmente, los costes de (GP, 2007) se han adaptado para pasar de €-2003 a €-2007. Referimos al lector a la referencia (GP, 2007) si quiere profundizar sobre las hipótesis y resultados de los escenarios de costes de las energías renovables que vamos a emplear.

4.2.2 Costes de emisiones de CO₂

En este punto presentamos el escenario de costes de emisiones de CO₂ que hemos adoptado, el cual constituye uno de los elementos de internalización de externalidades requerido para poder establecer una comparación adecuada entre los costes de los distintos tipos de energía.

El primer punto a tener en cuenta es que actualmente los mercados de emisiones afectan tan solo a una pequeña parte de los sectores energéticos, y quedan excluidos de los mismos

908 No solo hay diferencias importantes entre los escenarios de distintas referencias, sino que los escenarios de una misma referencia se modifican de forma significativa en cortos intervalos de tiempo.

909 Lo cual, por otro lado, inevitablemente desemboca en la situación en que *bruscamente* nos damos cuenta de que la realidad evoluciona en otro sentido. Esta *brusquedad* es lo que habitualmente denominamos crisis, y suele constituir un proceso bastante traumático de adaptación a la realidad.

910 Lo que entendemos que no constituye una hipótesis adecuada, ni tan solo para el contexto BAU, es el que la demanda se mantendrá acotada por mantener privada a una gran parte del planeta del acceso a esos recursos energéticos. Esta desigualdad estructural en la que se ha apoyado la evolución del contexto BAU hasta la actualidad ha alcanzado su límite, y si no proporcionamos las vías para que desaparezca de forma gradual, el sistema social generará las discontinuidades necesarias para superar este límite.

todos los sectores difusos entre los que se encuentran el sector edificación y el sector transporte. El planteamiento que hemos adoptado a este respecto es que gradualmente todos los sectores se van incorporando al mercado de emisiones o mecanismos equivalentes (como puede ser una carga impositiva asociada a las emisiones), y por tanto el coste de estas emi-

siones se va gradualmente incorporando al coste correspondiente de cada tipo de energía final.

La evolución del precio del CO₂ en los mercados existentes ha sido bastante irregular, y ha alcanzado cotizaciones de la tonelada de CO₂ que han estado bastante por debajo de los

Figura 556. Evolución del precio mensual medio del CO₂ en el mercado de la UE (<http://www.bluenext.eu/>).

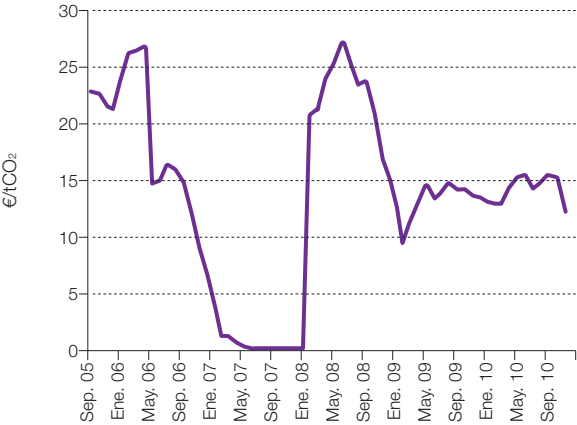


Figura 557. Evolución del precio anual medio del CO₂ en el mercado de la UE.



costes actuales de eliminación de CO₂ correspondientes a la mayoría de las tecnologías de generación requeridas para articular la transición hacia el contexto E3.0, e incluso han alcanzado valores prácticamente nulos en algunos periodos⁹¹¹. La figura 556 recoge la evolución de los precios mensuales medios a lo largo de los últimos años en el mercado de la UE, mientras que la figura 557 presenta los correspondientes precios anuales medios.

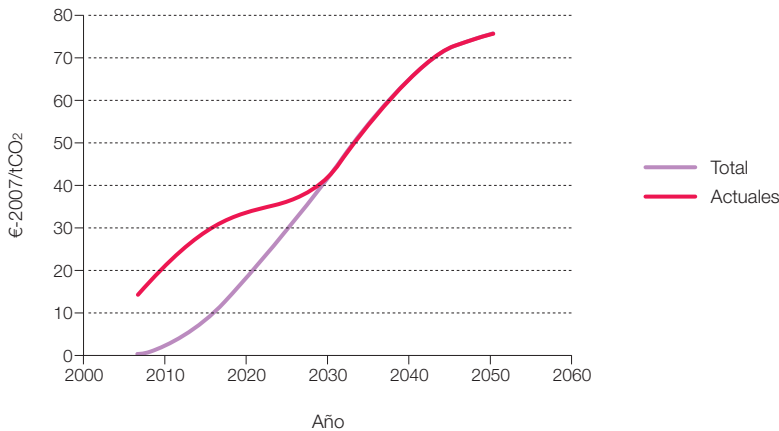
Estas fuertes irregularidades en el histórico de los precios del CO₂ constituyen un mal punto de partida para la elaboración de escenarios. Sin embargo hay tres elementos que parecen claros para ser tenidos en cuenta al elaborar un escenario de precio del CO₂:

- Los costes tenderán a ir incrementándose al pasar el tiempo, a medida que se vaya constatando que las señales de precios proporcionados por los mismos son insuficientes, y que los requerimientos de reducción de emisiones vayan haciéndose más estrictos.

- A medida que vaya pasando el tiempo, todos los sectores responsables de emisiones deberán ir incorporándose al mercado de emisiones o incorporando otros mecanismos para que paguen por el CO₂ emitido.
- Cabe esperar un retraso importante en la respuesta de señales de precio en relación a los requerimientos reales de reducción de emisiones, dado que el contexto regulatorio en el que se desarrollan estos mercados es el de la asignación de derechos de emisiones, que fácilmente puede llevar un desfase mínimo de 10 años respecto a los requerimientos del sistema climático. Por el mismo motivo, cabe esperar que los precios del CO₂ en el mercado se encuentren por debajo de los costes de la internalización real del impacto de las emisiones de CO₂.

Con estas consideraciones en mente, hemos adoptado los dos escenarios del precio del CO₂ que aparecen en la figura 558. El escenario denominado “actuales” se refiere

Figura 558. Escenarios de costes de emisiones de CO₂. El escenario denominado “actual” se refiere a los sectores que actualmente ya se encuentran participando en los mercados de emisiones de CO₂, mientras que el “total” se refiere al promedio con el total de sectores.



⁹¹¹ A lo cual contribuye la intervención regulatoria asociada a la concesión de excesivos derechos de emisiones.

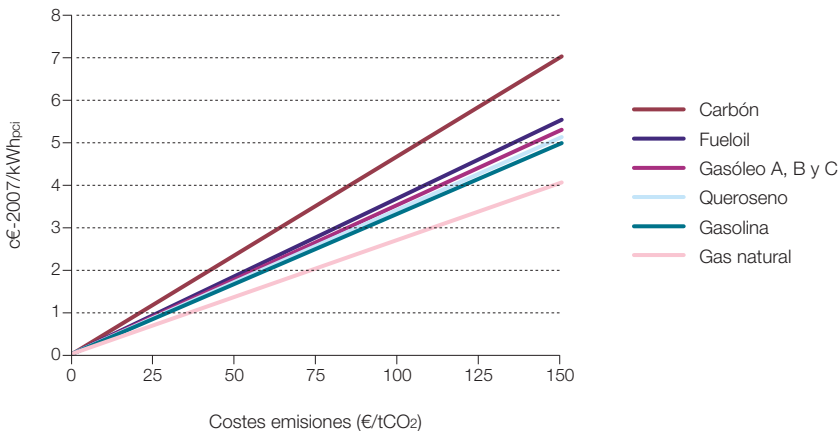
a la evolución del precio del CO₂ en los sectores que actualmente ya disponen de un mecanismo de asignación de coste a las emisiones de CO₂. Por otro lado, el escenario denominado “total” se corresponde al total de las emisiones de CO₂, y por tanto recoge el efecto de dilución de costes entre esa parte⁹¹² de las emisiones de sectores, con mecanismo de asignación de emisiones con el conjunto de las emisiones de CO₂ de todos los sectores. Ambos escenarios van convergiendo a medida que va creciendo el porcentaje de las emisiones totales que se ven afectadas por el precio del CO₂, hasta que a partir del año 2030 ambos escenarios coincidirían al encontrarse todas las emisiones incorporadas en algún mecanismo de asignación de costes a las emisiones de CO₂.

La repercusión del coste del CO₂ sobre el coste de las distintas formas de energía depende tanto de los coeficientes de emisiones de cada combustible, como de los procesos de transformación a los que se somete dicho

combustible para proporcionar la forma de energía final suministrada.

En las figuras 559 y 560 recogemos el efecto del precio del CO₂ en el sobrecoste de distintos combustibles (referido al contenido energético del combustible, y por tanto previo a cualquier forma de transformación en otras formas de energía final). La primera figura recoge el sobrecoste en un punto dado a lo largo del tiempo, mientras que la segunda figura recoge los sobrecostes normalizados⁹¹³ a lo largo de un periodo de 30 años, suponiendo constante⁹¹⁴ el precio del CO₂ en este periodo. Como podemos apreciar más adelante, el sobrecoste asociado a las emisiones de CO₂ fácilmente alcanza valores del orden de magnitud del precio actual de estos combustibles, lo cual constituye una clara indicación de cómo de incorrecta es la señal de precios asociada a estos combustibles, y de cómo de erróneas son las comparaciones de costes entre estos combustibles y las tecnologías renovables que ya tienen internalizados los costes asociados a las emisiones.

Figura 559. Sobrecostes en el precio de distintos combustibles como consecuencia de la internalización de costes de las emisiones de CO₂. Resultados sin normalizar.

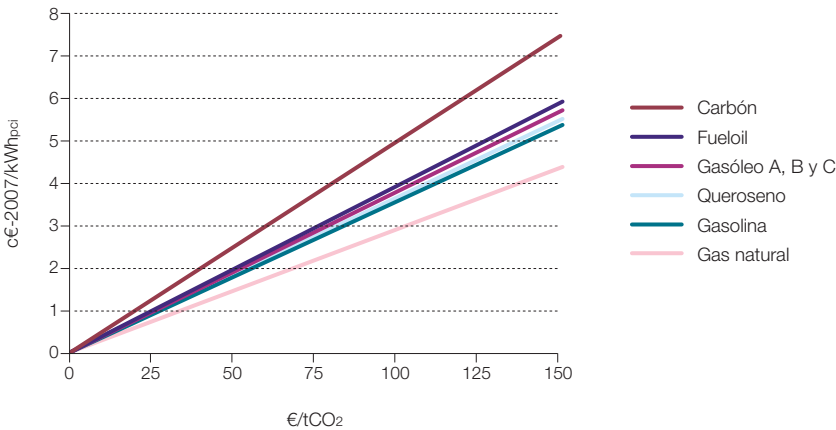


912 Pues en los sectores que actualmente participan en el mercado, no todas sus emisiones tiene un coste asociado: solo aquellas más allá de los derechos de emisiones asignados se ven actualmente repercutidas por el coste del CO₂ en el mercado.

913 Los sobrecostes normalizados son los que se puede comparar directamente con los LEC.

914 Realmente, según los escenarios de precio del CO₂ que anteriormente hemos presentado, el precio del CO₂ se ve sometido a una inflación incremental a lo largo del tiempo. Este aspecto no ha sido retenido en este punto para proporcionar información directa de la relación entre el precio del CO₂ y el correspondiente sobrecoste en el precio de la energía del combustible considerado. Posteriormente, al desarrollar los escenarios de costes de los distintos tipos de combustible ya incorporaremos el efecto de esta inflación incremental.

Figura 560. Sobrecostes en el precio de distintos combustibles como consecuencia de la internalización de costes de las emisiones de CO₂. Resultados normalizados.

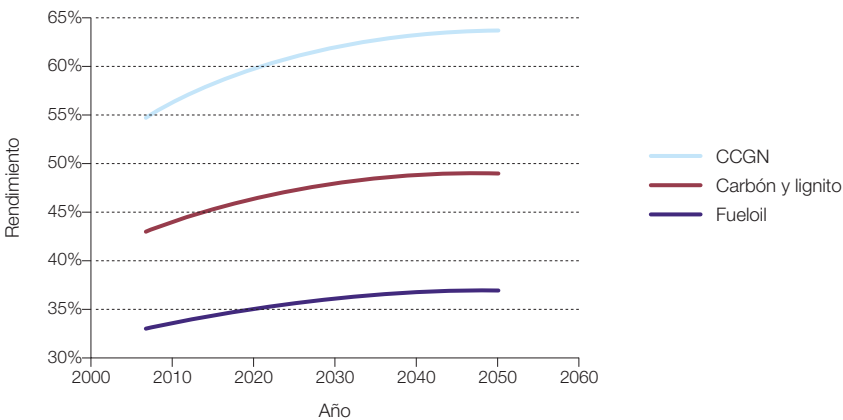


Por lo que se refiere a la electricidad, la repercusión de los costes de emisiones sobre el precio final de la electricidad depende de cómo evolucione el rendimiento de las centrales termoeléctricas del mix BAU. Siguiendo la referencia ([R]E-2010, GPI) hemos adoptado los escenarios de mejora⁹¹⁵ del rendimiento de la generación termoeléctrica convencional que aparecen reflejados en la figura 561.

4.2.3 Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles constituyen un recurso preciado y escaso, que ha estado en la base de los modelos energéticos de contexto BAU que han impulsado el desarrollo económico de una parte relativamente pequeña de la humanidad. La exclusividad en el uso de estos recursos a unos pocos ha llegado a su

Figura 561. Evolución de los rendimientos de las centrales térmicas en el mix BAU.



⁹¹⁵ Cabe resaltar que algunos de estos escenarios de mejora de las tecnologías convencionales pueden resultar excesivamente optimistas, lo cual nos sitúa en una posición conservadora desde el punto de vista de los análisis desarrollados.

fin, por lo que la situación de demanda rápidamente creciente ejercida sobre un recurso escaso, que sería el contexto BAU, inevitablemente conduce hacia costes rápidamente crecientes de estos recursos.

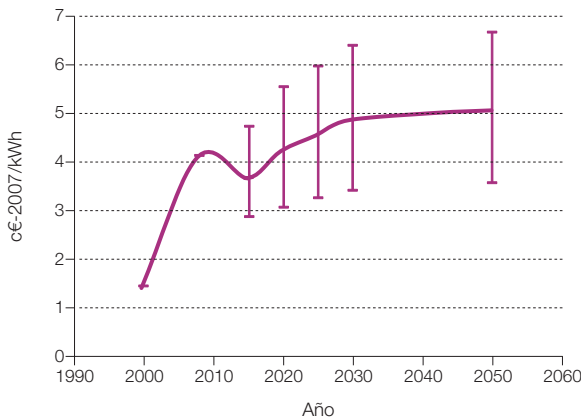
Si lo que el futuro nos depara son unas tasas de inflación acotadas y pequeñas sobre estos recursos, será porque la demanda sobre los mismos se ha limitado gracias a que parte de la población mundial se ha apartado de la senda del contexto BAU para evolucionar hacia el contexto E3.0, y ha reducido la presión sobre esos recursos escasos. ¡Ojalá que este sea el caso!, y por tanto la evolución futura de los costes de los recursos fósiles sea más parecida a los escenarios conservadores que encontramos en la actualidad que a los escenarios que nosotros vamos a desarrollar para este informe. Pero de cualquier forma, si ese es el caso, esa evolución futura no se corresponderá a un contexto BAU sino a un escenario de transición desde el contexto BAU al E3.0, y por tanto a nosotros no nos sirve para representar el contexto BAU en el marco de

este informe⁹¹⁶. Aún con todo, tal y como mostraremos más adelante, nosotros también hemos sido bastante conservadores al desarrollar las tasas de inflación de los combustibles fósiles, al establecer escenarios de saturación hacia el final del periodo analizado, por lo que implícitamente⁹¹⁷ ya estamos considerando que en el contexto BAU Español hay una parte del planeta que abandona la senda BAU para pasarse a la E3.0.

Como ejemplo de los escenarios oficiales disponibles relativos a la evolución de los precios de los combustibles fósiles, recogemos los escenarios de la Agencia Internacional de la Energía recogidos en sus publicaciones (WEO-2009 y ETP-2010)⁹¹⁸, donde se nos plantean tres escenarios, el de referencia, el alto, y el bajo. La figura 562 recoge el escenario correspondiente al precio del petróleo.

La figura 563 nos recoge los escenarios altos para los precios del petróleo, gas natural y carbón según las referencias (WEO-2009 y ETP-2010), mientras que la figura 564 recoge las tasas anuales equivalentes (TAE)

Figura 562. Escenarios de referencia, bajo y alto, para el precio del petróleo, según (AIE, WEO, 2009) y (AIE, ETP, 2010).



916 En este informe también desarrollaremos escenarios de transición desde el contexto BAU al E3.0, pero el punto de partida para estos escenarios de transición es tener correctamente caracterizados los contextos BAU y E3.0 y, por tanto, no es posible edificar un escenario BAU sobre un escenario de costes de los recursos energéticos que se corresponde ya en sí a un escenario de transición.

917 Este es un elemento que no hay que perder de vista al analizar los resultados de este informe: las ventajas de la transición desde el contexto BAU al E3.0 podrían ser incluso superiores a las que hemos obtenido, si una parte mayor del planeta permanece anclada en el contexto BAU.

918 WEO = World Energy Outlook; ETP = Energy Technologies Perspective.

correspondientes a la inflación incremental⁹¹⁹ implícita en estos escenarios.

Estos escenarios de la AIE resultan realmente sorprendentes, en especial por lo que respecta a la contención de costes de estos recursos que pronostican. En efecto, como

podemos ver, a pesar de la existencia de unas tasas tremendamente elevadas de inflación incremental en el histórico reciente (del orden de un 14%/a para el periodo 2000-2008), los escenarios de la AIE pronostican unas tasas de inflación incremental decrecientes con el tiempo y con un salto

Figura 563. Escenarios altos, para el precio del petróleo, gas natural y carbón, según (AIE, WEO, 2009) y (AIE, ETP, 2010).

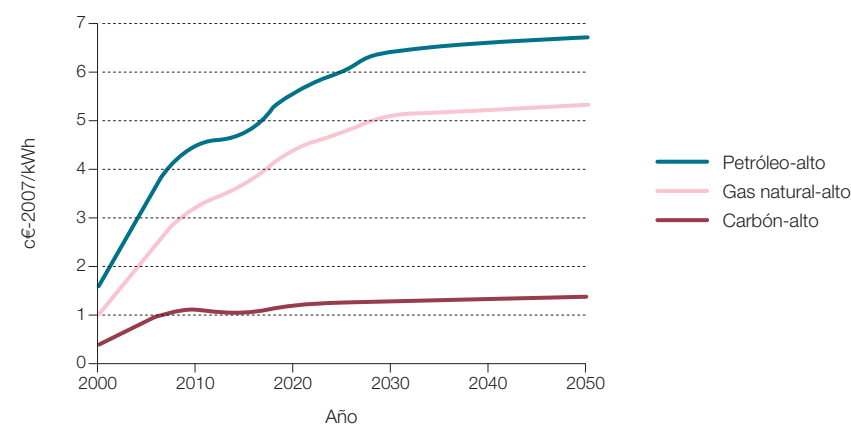
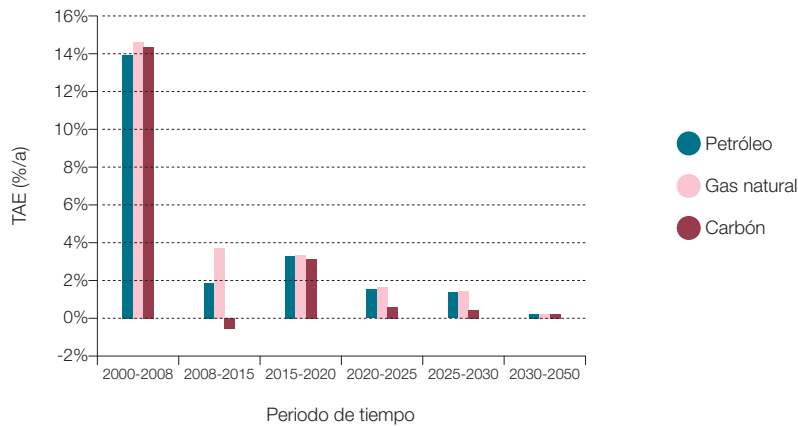


Figura 564. Tasas anuales equivalentes (TAE) de inflación incremental asociadas a los escenarios de precios de los combustibles en las referencias (AIE, WEO, 2009) y (AIE, ETP, 2010).



⁹¹⁹ Nótese que esta tasa de inflación es incremental a la inflación general, por provenir de los costes expresados en términos de dinero constante (es decir, incluyendo ya los efectos de la inflación general).

muy brusco al pasar al siguiente periodo de tiempo (2008-2015). Estas tendencias realmente parecen totalmente injustificables según los argumentos básicos de una demanda galopante sobre unos recursos finitos y escasos, y del requerimiento de internalización de costes para estos recursos. Es como si estos escenarios apuntaran a intentar infundir una falsa esperanza de estabilidad de los precios de los combustibles fósiles, esperanza que se trunca sistemáticamente cuando los valores futuros pasan a ser históricos en ediciones de años posteriores de estos informes.

Por lo que se refiere a la evolución histórica reciente del precio de estas formas de energía, recogemos a continuación algunos resultados del análisis de los datos disponibles en Eurostat.

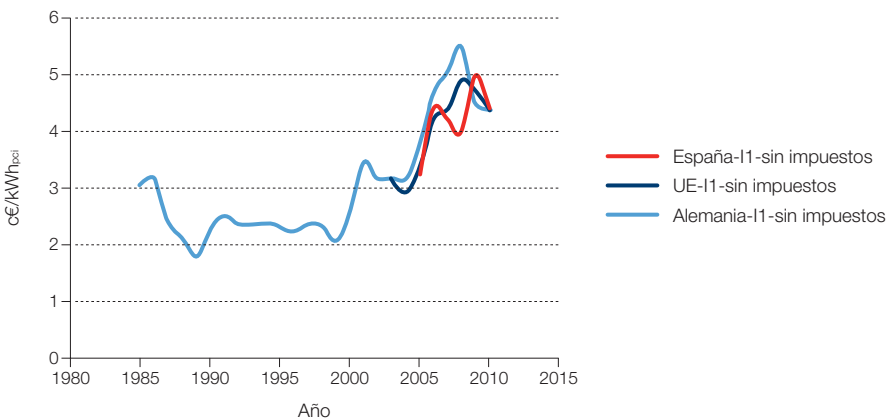
Las figuras 565 y 566 recogen la evolución histórica del precio del gas natural, sin impuestos, para un consumidor industrial y otro doméstico en España, Alemania (como

ejemplo de serie histórica más larga), y el conjunto de la UE.

Por lo que respecta a la serie más larga, la correspondiente a Alemania, observamos un periodo inicial en el que los precios del gas natural se mantuvieron aproximadamente constantes en términos de dinero corriente, asociado a un periodo de demanda relativamente baja de este recurso. Desde el año 2000 en que la demanda de este recurso energético ha empezado a crecer de forma más acentuada, se observa, a pesar de las oscilaciones interanuales, una tendencia media claramente creciente en el precio de este recurso, que de cara al futuro, en un contexto BAU de demanda fuertemente creciente de este recurso limitado, cabría esperar que todavía se acentuase más.

Si nos fijamos en las tasas anuales equivalentes de inflación incremental asociadas a estas series históricas en términos de precios constantes, la figura 567 nos muestra cómo ésta

Figura 565. Evolución histórica del precio del gas natural sin impuestos para un consumidor industrial I1 (pequeño consumidor por debajo de 278 MWh/a). Procesado a partir de datos Eurostat.



se va incrementando al reducir el periodo de tiempo considerado, llegando a alcanzar valores muy elevados en los últimos años.

Otro elemento relevante de los precios es la reducción del precio al incrementarse el

consumo. La figura 568 recoge el ejemplo del gas natural para consumidores industriales en España. En el caso de estructuras tarifarias con un gran peso de la potencia instalada, como es el caso de la electricidad, estas diferencias se hacen mucho más acusadas.

Figura 566. Evolución histórica del precio del gas natural sin impuestos para un consumidor doméstico D3 (consumo por encima de 56 MWh/a). Procesado a partir de datos Eurostat.



Figura 567. Tasas anuales equivalentes de inflación incremental en distintos periodos de tiempo para el precio del gas natural doméstico D3 (consumo superior a 56 MWh/a). Procesado a partir de datos Eurostat.

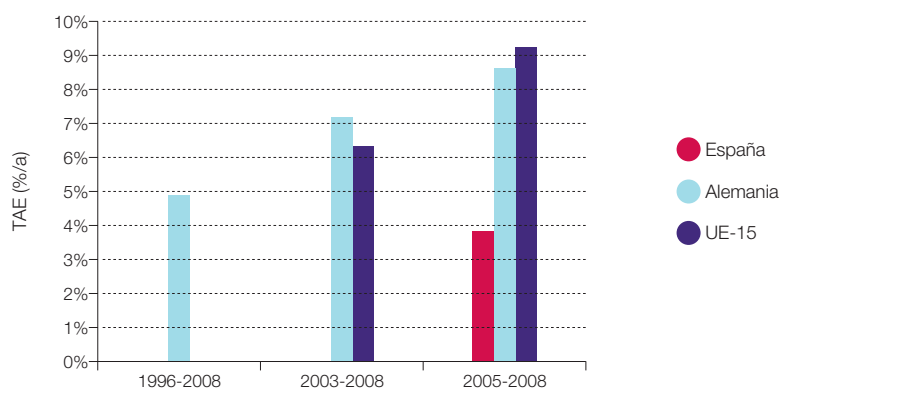


Figura 568. Comparación de los precios del gas natural sin impuestos para un pequeño consumidor industrial (I1: hasta 0,28 GWh/a) y un gran consumidor industrial (I5: a partir de 1111 GWh/a).



Figura 569. Evolución histórica reciente de los precios de la gasolina, en términos constantes e incluyendo impuestos. Procesado a partir de datos Eurostat.



Por lo que respecta a los combustibles de automoción, las figuras 569 y 570 nos muestran la evolución histórica reciente del precio de la gasolina y del gasóleo de automoción, en términos de dinero constante e incluyendo los impuestos, en España y en otros países de nuestro entorno. Podemos observar que en general los precios de estos combustibles en

España han sido inferiores a los de países como Alemania y Dinamarca, lo cual indica que cabe esperar un mayor incremento de costes en España de cara al futuro⁹²⁰. Por lo general, se puede apreciar una tendencia media creciente, es decir, una inflación incremental significativa en el precio de estos recursos energéticos, que de cara al futuro, en

920 De hecho, estas series históricas no recogen los precios registrados a principios de 2011, que en España ya se pusieron en el orden de los valores presentados para Alemania y Dinamarca como consecuencia del incremento del precio del petróleo asociado a las inestabilidades sociopolíticas en el norte de África y Oriente Próximo.

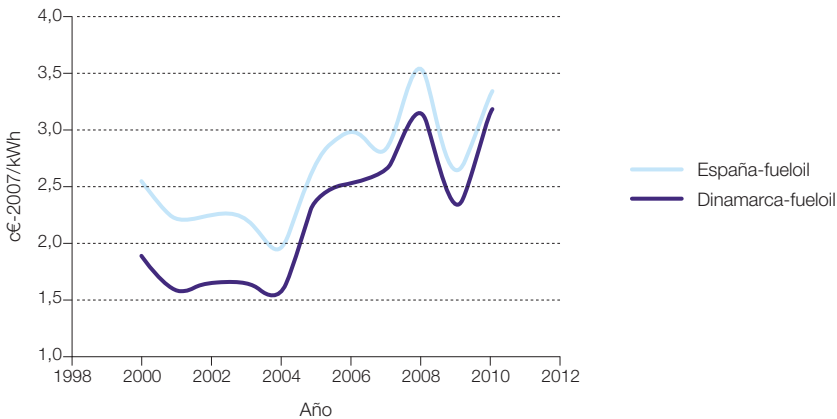
un contexto BAU con una demanda creciente sobre estos recursos escasos y que hasta ahora se han administrado principalmente para el bien de unos pocos sin repercutir completamente sus beneficios sobre el conjunto de la población de los países de origen, solo cabe esperar que se incremente significativamente esta inflación incremental.

Pero de hecho, las figuras anteriores, al presentar los precios con impuestos, la inflación incremental real del recurso se ve atenuada. En la figura 571 podemos observar la evolución de los precios del fueloil industrial sin impuestos, confirmandose una mayor tendencia inflacionista que en los precios de gasolina y diésel que incluían impuestos.

Figura 570. Evolución histórica reciente de los precios del gasóleo de automoción, en términos constantes e incluyendo impuestos. Procesado a partir de datos Eurostat.



Figura 571. Evolución histórica reciente de los precios del fueloil industrial, en términos constantes y sin incluir impuestos. Procesado a partir de datos Eurostat.



Cuantificando las tasas anuales equivalentes de inflación incremental durante el periodo 2003-2008, en la figura 572 podemos observar que estas tasas han sido importantes. Para los casos con impuestos, esta inflación incremental aparece más contenida (aunque para el diésel alcanza valores nada despreciables

del 6%/a), pero sin impuestos, esta inflación incremental se sitúa en el orden del 10%/a o superior.

Por lo que se refiere a los precios de importación del petróleo en España, la figura 573 nos recoge su evolución durante los últimos 20

Figura 572. Tasas anuales equivalentes de inflación incremental de los precios de la gasolina y diésel (con impuestos) y del fueloil industrial (sin impuestos), para el periodo 2003-2008, en España, Alemania y Dinamarca.

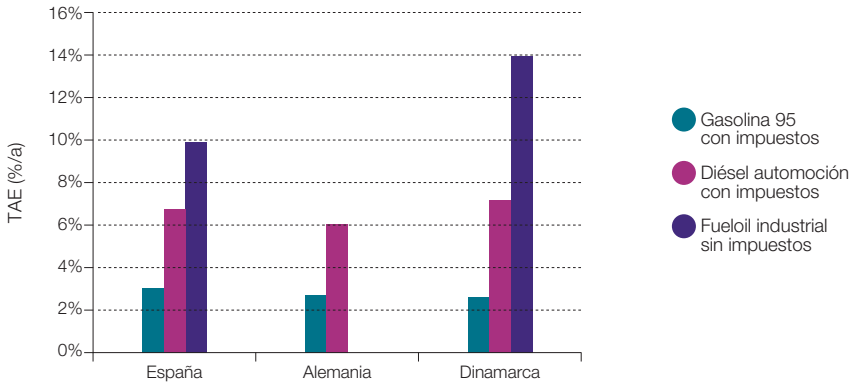


Figura 573. Evolución de los precios de importación en España a lo largo de los últimos 20 años, en términos de dinero corriente y constante. Información procesada a partir de datos AIE (<http://www.aie.org/stats/index.asp>).



años, tanto en precios corrientes como constantes, donde se puede apreciar una importante inflación incremental.

De hecho, si procesamos las tasas anuales equivalentes de inflación incremental del

precio del petróleo importado en España durante distintos periodos recientes, observamos, tal y como nos muestra la figura 574, que dichas tasas son muy elevadas y crecientes a lo largo del tiempo, y llegan a alcanzar valores del orden del 17%/a en el periodo

Figura 574. Tasa anual equivalente de inflación incremental en el precio del petróleo importado en España a lo largo de distintos periodos de tiempo.

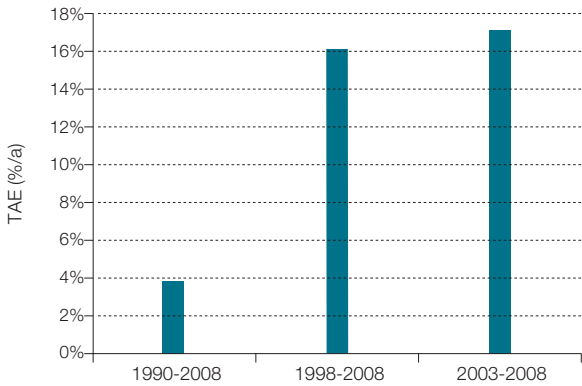
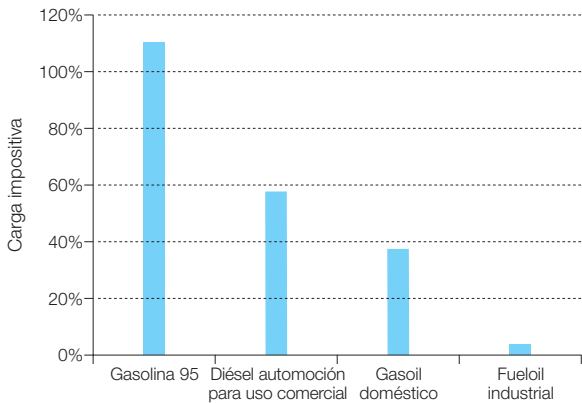


Figura 575. Peso relativo de la carga impositiva respecto al precio del recurso sin impuestos para España en 11/2010 (procesado a partir datos AIE (<http://www.aie.org>)).



2003-2008. En este contexto, y teniendo en cuenta que la demanda planetaria de petróleo dentro de un contexto BAU seguirá creciendo prácticamente de forma exponencial en los años próximos, junto al carácter finito y escaso de este recurso, no deberíamos esperar otro escenario que no fuera el de precios rápidamente crecientes para este recurso.

Para apreciar la importancia de la carga impositiva, y la indexación a los precios del petróleo, en las figuras 575 y 576 recogemos esta información para los precios en España a 11/2010 para la gasolina, el diésel, el gasóleo doméstico y el fueloil industrial. Como podemos apreciar el peso de la carga impositiva es muy dispar entre los

Figura 576. Indexación al precio del petróleo para España en 11/2010 (procesado a partir datos AIE (<http://www.aie.org>)).

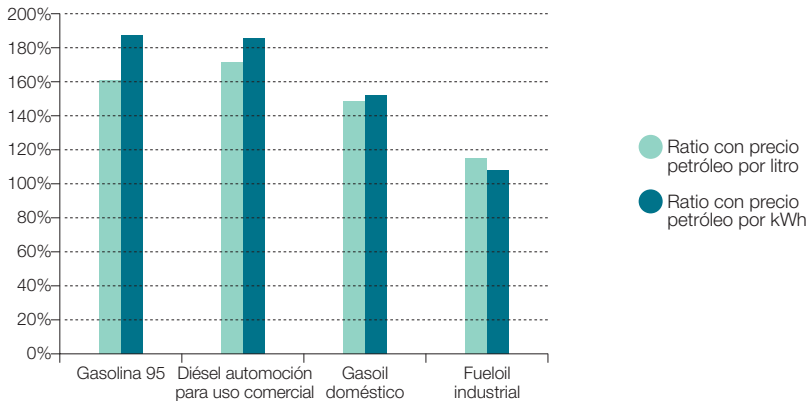
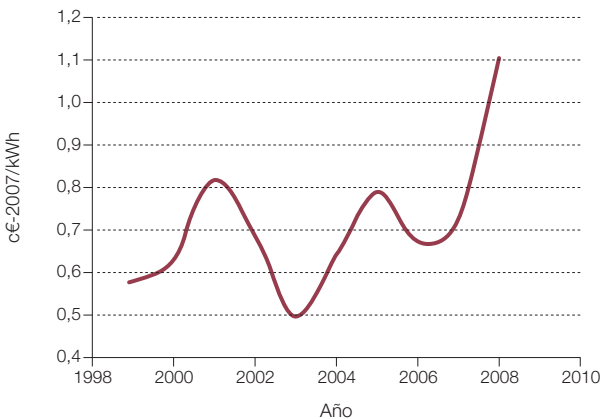


Figura 577. Evolución del precio del carbón importado en la UE a lo largo de los últimos años, en términos de dinero constante (procesado a partir de datos “AIE Key Statistics”).



distintos componentes, y es especialmente elevado en las gasolinas.

Por lo que respecta al carbón, en la figura 577 vemos recogidos los precios correspondientes al carbón importado en la UE a lo largo de los últimos años, y se puede

apreciar una tendencia media claramente creciente, que en términos de tasa anual equivalente de inflación incremental conduce a un 7,4%/a en el periodo 1999-2008.

En la figura 578 podemos comparar la evolución histórica reciente de los precios de venta

Figura 578. Evolución durante los últimos años de los precios de venta en España de distintos combustibles fósiles, en términos de dinero constante (procesado a partir de datos “AIE Key Statistics”).

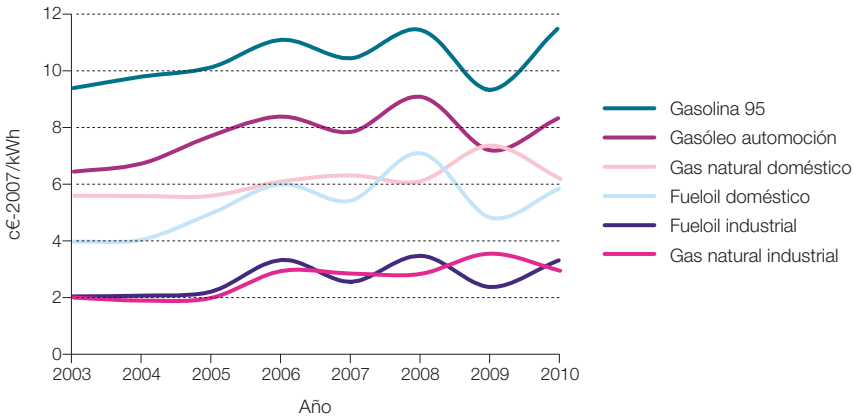
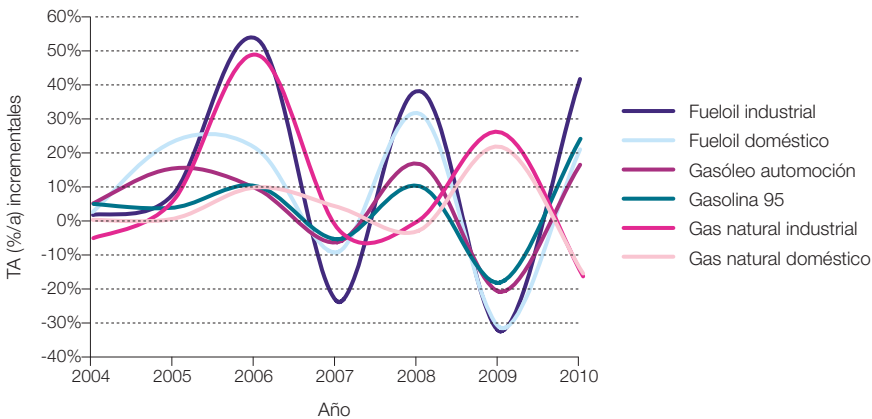


Figura 579. Evolución durante los últimos años de las tasas de inflación incremental asociadas a la venta en España de distintos combustibles fósiles (procesado a partir de datos “AIE Key Statistics”).



de distintos combustibles fósiles en España, mientras que la figura 579 nos presenta las correspondientes tasas de inflación incremental anual, y la figura 580 las tasas anuales equivalentes de inflación incremental durante el periodo 2003-2010. En estas figuras podemos apreciar una tendencia media creciente en los precios de venta⁹²¹ de estos combustibles, con unas tasas de inflación incremental anual muy inestables, pero que en valor promedio conducen a unas tasas anuales equivalentes de inflación incremental en el periodo 2003-2010 que son muy importantes, a pesar de la reducción de precios asociada al año 2009 y ocasionada como respuesta a la reducción de consumo por la crisis económica.

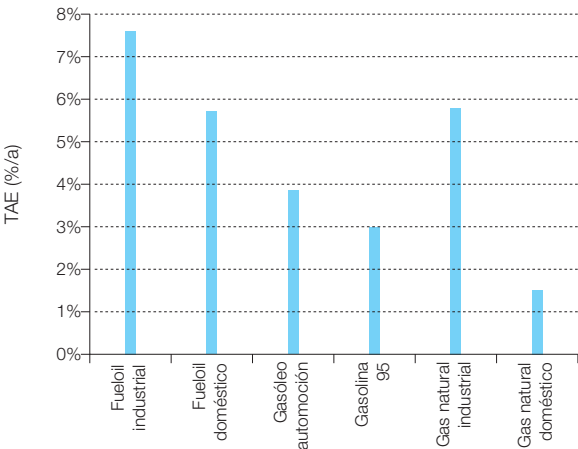
De cara al desarrollo de escenarios del coste de los combustibles fósiles, partimos de los valores existentes en el año 2007⁹²², y que en términos de precio final, sin impuestos, y en dinero constante del año 2007, podemos

comparar en la figura 581. En esta figura apreciamos la ventaja de emplear las mismas unidades de coste para todas las fuentes de energía, lo que favorece una comparación clara y directa entre ellas.

El siguiente paso para desarrollar los escenarios de costes es adoptar unas tasas de inflación incremental de los costes de estos recursos.

Como hemos visto anteriormente la evolución de los costes de los combustibles fósiles se ve sometida a una tasa incremental de inflación creciente a medida que pasa el tiempo, consecuencia directa de la economía de los combustibles fósiles (recursos finitos y escasos sometidos a una demanda creciente). La aplicación de una tasa de inflación incremental constante conduciría a un crecimiento exponencial del precio, y si la tasa de inflación incremental crece con el tiempo, el crecimiento que cabría esperar es

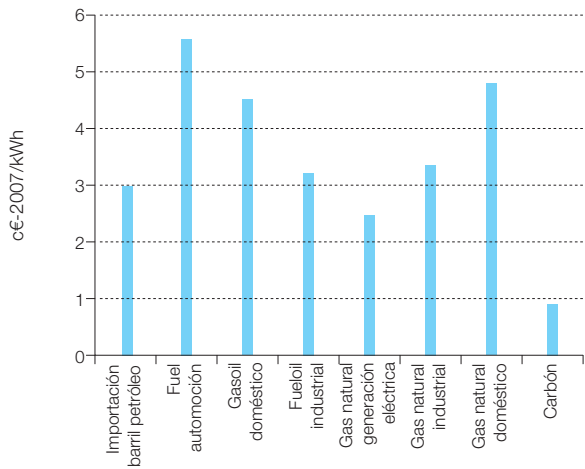
Figura 580. Valor de las tasas anuales equivalentes de inflación incremental durante el periodo 2003-2010 asociadas a la venta en España de distintos combustibles fósiles (procesado a partir de datos “AIE Key Statistics”).



⁹²¹ Ya hemos comentado anteriormente que los precios de venta camuflan el incremento del recurso por la dilución y distorsión que le proporciona la carga impositiva.

⁹²² El año de inicio del desarrollo de escenarios en este informe.

Figura 581. Valores de partida del precio de los combustibles fósiles, en términos de precio final sin impuestos, y en dinero constante de 2007.



todavía superior. La figura 582 recoge la evolución histórica del precio de importación de petróleo en España anteriormente presentada, a la que se han superpuesto dos ajustes exponenciales: uno para el periodo⁹²³ 1990-2008 y otro para el periodo 1998-2008. El incremento de pendiente del ajuste exponencial para el periodo 1998-2008 es un reflejo directo de esa tasa de inflación incremental creciente con el tiempo.

Empecemos por explorar el efecto de extrapolar las tasas de inflación incremental existente en los periodos 1990-2008 y 1998-2008 hacia el futuro, suponiendo que las tasas de inflación incremental se quedaran congeladas en los valores medios correspondientes a estos dos periodos de tiempo (en lugar de seguir creciendo en el futuro), y prolongando los ajustes exponenciales de la figura anterior hacia el futuro. En estas condiciones, el precio⁹²⁴ del barril de petróleo en el año 2050 sería de 499 \$-2007/barril si empleamos el ajuste exponencial del periodo 1990-2008, y asciende hasta 10.091

\$-2007/barril si empleamos el ajuste exponencial del periodo 1998-2008. La figura 583 recoge la evolución hasta el año 2030.

Es evidente que en estas condiciones, que son las que cabría esperar al extrapolar el contexto BAU al conjunto del planeta y llevarlo hacia el futuro, la economía mundial colapsaría totalmente. Por tanto cabe esperar que la tendencia BAU evolucione en una de las dos direcciones siguientes, ambas para acotar las tasas de inflación incremental de los recursos fósiles:

- La mayoría de las economías del planeta no reaccionan ante esta situación de forma significativa, por lo que los elevados precios de los recursos fósiles desencadenan en episodios de crisis profunda que acotan el crecimiento del precio de los combustibles fósiles.
- Mirado desde la perspectiva positiva, cabría pensar que una parte del planeta optará por iniciar la transición hacia un contexto E3.0,

923 El año 2009 se excluye del análisis por estar sometido a las perturbaciones ocasionadas por el periodo de crisis que camufla las tendencias BAU.

924 De forma puntual, aquí retomamos las unidades convencionales de precios del barril de petróleo (\$/barril) para que se pueda poner en contexto.

y aligerará la presión sobre los recursos fósiles, de tal forma que se contengan las tasas de inflación incremental a las que se ven sometidos estos recursos en unos valores más tolerables para las economías que siguen siendo dependientes de estos recursos. Sin embargo, en esta situación, no se nos debe escapar que las condiciones en

que se quedan las economías que optaron por la transición al contexto E3.0 son muchísimo más favorables que las condiciones en que se quedan las economías que permanecieron en el contexto BAU y están, por tanto, lastradas por el precio creciente de esos recursos fósiles de los que dependen.

Figura 582. Ajuste de tendencias exponenciales a los datos históricos de precios de importación de petróleo en España (procesado a partir de datos AIE: <http://www.aie.org/stats/index.asp>).

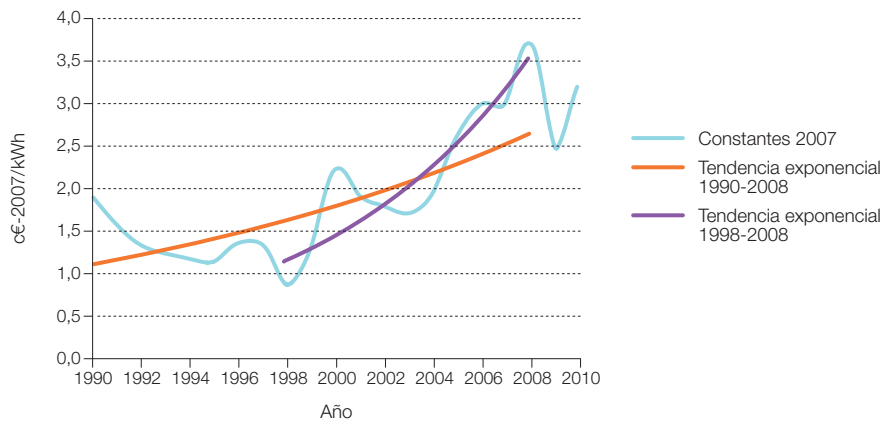
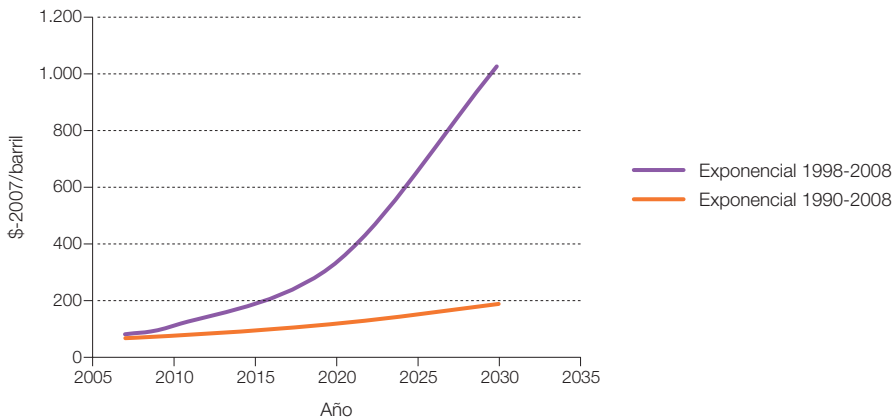


Figura 583. Aplicación de las tendencias exponenciales históricas del precio del barril de petróleo para proyectar al futuro.



Por tanto podemos apreciar cuánta incertidumbre hay de cara a desarrollar escenarios del precio de los combustibles fósiles. En esencia, detrás de cada escenario debe haber respuesta a preguntas de este estilo:

- ¿Hasta qué nivel se suponen perpetuados los niveles de desigualdad entre las distintas economías del planeta⁹²⁵?
- ¿Cuál es el porcentaje de transición entre las distintas economías mundiales hacia un contexto E3.0?
- ¿Cuántas economías se supone que van a colapsar y con qué intensidad los correspondientes periodos de crisis?

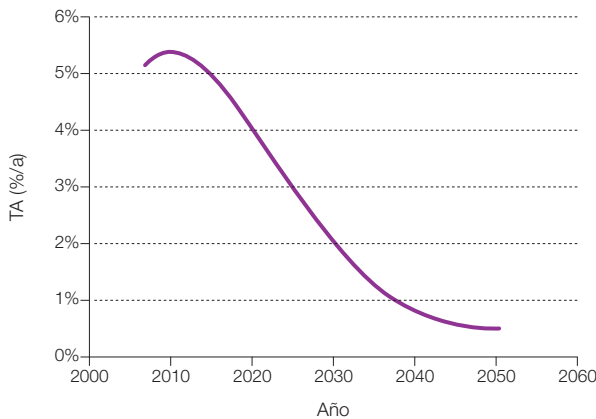
Y los valores finales del coste del petróleo para los distintos escenarios, de acuerdo a la respuesta a las preguntas anteriores, se encontrarán en cualquier lugar en el rango entre los 200-20.000 \$-2007/barril.

Nosotros optamos por un enfoque positivo, y vamos a asumir, por tanto, que en un contexto

de igualdad entre las distintas economías del mundo⁹²⁶, una gran parte de ellas optan por una transición hacia el contexto E3.0, para conducirlas por tanto a una evolución del precio de los combustibles fósiles que tiende a estabilizarse hacia el final del escenario. Y a partir de este punto, el análisis se centra en analizar cuáles serán las consecuencias para España si opta por ser una de las economías que se quedan ancladas en el contexto BAU. En este sentido, es preciso no perder de vista que los resultados que presentemos para el contexto BAU se corresponden con la mejor de las posibles alternativas⁹²⁷, cuya materialización depende de que la mayoría de las economías del planeta opten por evolucionar hacia el contexto E3.0.

La figura 584 recoge el escenario adoptado para la evolución de las tasas anuales de inflación incremental en el precio del petróleo, mientras que la figura 585 recoge el escenario correspondiente de evolución de los precios del petróleo en sus unidades convencionales⁹²⁸, mientras que en la figura 586 recogemos este escenario en términos de las

Figura 584. Escenario adoptado para las tasas anuales de inflación incremental en los precios del petróleo.



925 Y profundizando más, ¿en función de qué procedimientos y argumentos se supone que se mantienen estos niveles de desigualdad? Claramente, y mirando los acontecimientos que se están desarrollando ya en el año 2011, solo habría un modo de mantener estas desigualdades, y es un uso despiadado de la fuerza. ¿Quién le pone esa etiqueta al escenario correspondiente del coste del petróleo, y en qué medida se evalúa el coste de esas "externalidades"?

926 Es decir, que no se priva del acceso a los recursos necesarios para seguir un proceso de desarrollo adecuado al grueso de la población del planeta.

927 Observando las evidencias históricas y actuales, cabría pensar que las posibilidades de que se dé este escenario son bastante bajas. Pero el despliegue de inteligencia en el sistema social es perfectamente capaz de producir cambios en escalón que nos sitúen en la trayectoria de este escenario. Lo que tampoco hay que olvidar es que las alternativas menos favorables nos dirigirían de cabeza a episodios de crisis muy profundos.

928 Esta es la última concesión que hacemos a las unidades de costes convencionales del petróleo.

unidades comunes empleadas para todos los tipos de energía (c€/2007/kWh).

Por lo que respecta al carbón y el gas natural, en la figura 587 recogemos los escenarios de indexación con los costes del petróleo para estos dos combustibles.

Para el carbón hemos adoptado un escenario de indexación creciente ocasionado por la mayor disponibilidad de recurso de carbón y la saturación supuesta de los precios del petróleo. Sin embargo, hacia el final del periodo considerado también planteamos una saturación de los precios del carbón apoyada por

Figura 585. Escenario adoptado para la evolución de los precios del petróleo, en términos de unidades convencionales.

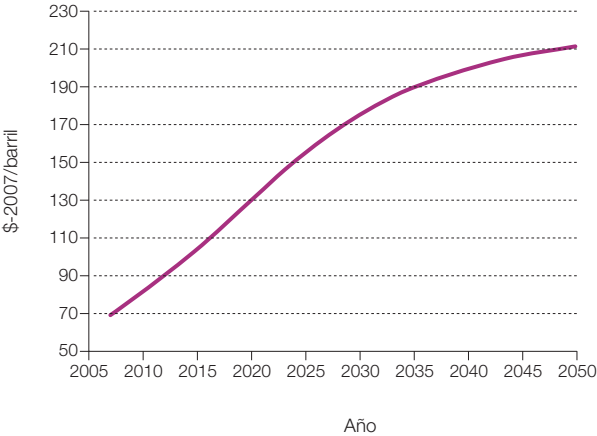


Figura 586. Escenario adoptado para la evolución de los precios del petróleo.

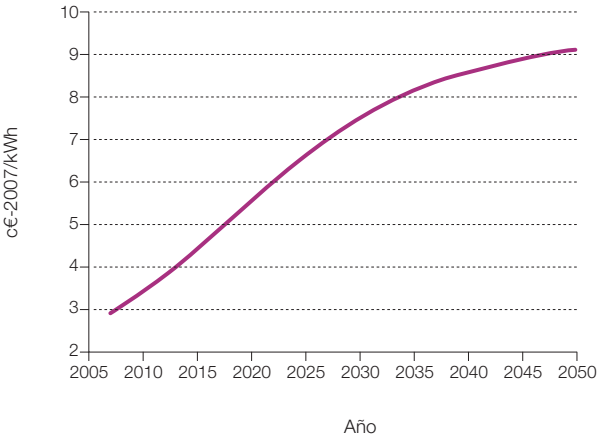
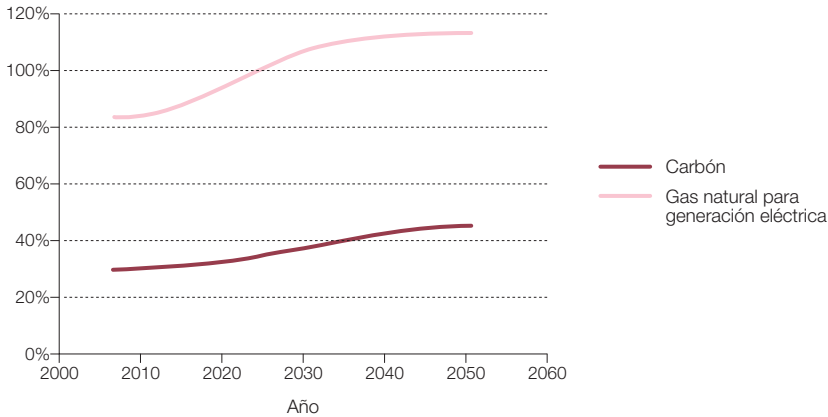


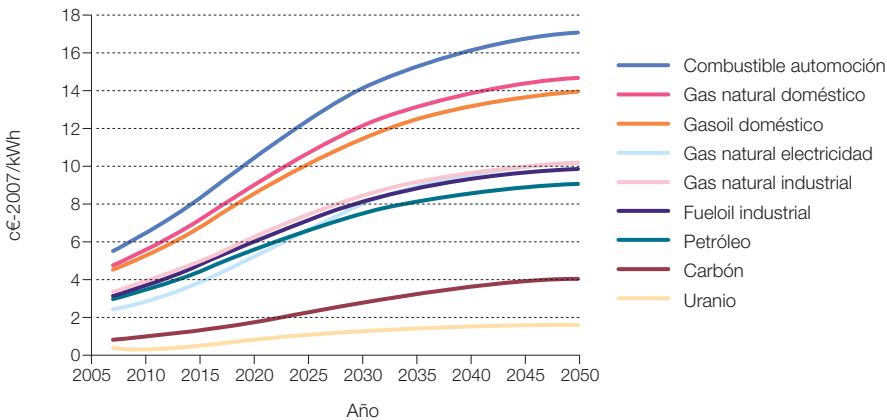
Figura 587. Escenarios adoptados de indexación de los costes del gas natural y del carbón a los del petróleo.



los mismos argumentos que en el caso del petróleo, pues a pesar de la mayor disponibilidad de recursos, sigue tratándose de un recurso limitado con una demanda global en el contexto BAU fuertemente creciente, a lo que hay que añadir que las consideraciones asociadas al calentamiento global es de prever que introduzcan límites al crecimiento de la demanda de este recurso.

Por lo que respecta al gas natural, al tratarse de un recurso de mayor calidad ambiental que el petróleo pero igualmente escaso, planteamos un escenario de indexación respecto al petróleo que inicialmente haga crecer su precio por encima del petróleo y finalmente tienda a una saturación por las mismas condiciones que en el petróleo.

Figura 588. Comparativa de los escenarios adoptados para la evolución del coste de distintos productos energético de origen fósil y nuclear.



Las indexaciones al precio del petróleo adoptadas para otros productos energéticos proceden del análisis de los valores históricos y actuales, y son de 188% para los combustibles de automoción, 153% para el gasóleo doméstico, 108% para el fueloil industrial, 113% para el gas natural industrial y 162% para el gas natural doméstico.

Para terminar, en la figura 588 reproducimos los escenarios de costes de los distintos productos energéticos fósiles adoptados para este estudio, donde por conveniencia hemos añadido el escenario para el coste del uranio desarrollado en el apartado siguiente.

4.2.4 Energía nuclear: combustibles y O&M

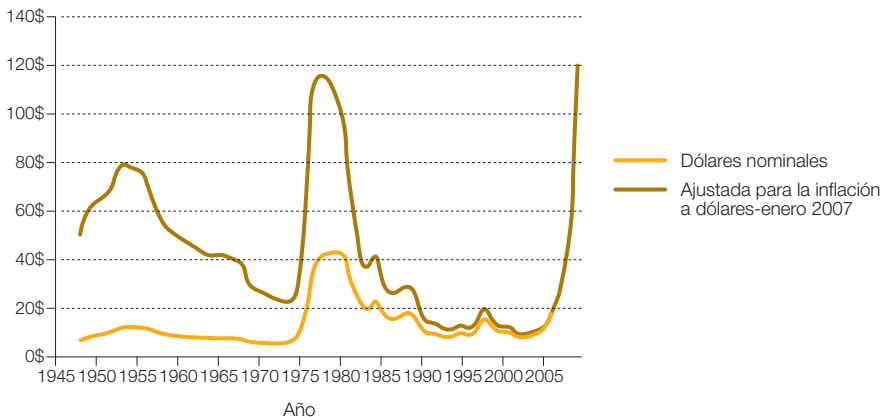
Por lo que respecta a la evolución de los costes de la materia prima⁹²⁹ para elaborar el combustible nuclear, su evolución histórica muestra una gran volatilidad, así como

una tendencia reciente al gran incremento de costes como consecuencia de la demanda creciente y del agotamiento de las reservas que suplementaban a la minería: el máximo mensual se alcanzó en junio de 2007 con un valor de 136 \$-2007/lb-U₃O₈.

Analizando la evolución del precio del uranio en la historia reciente, y adaptando a las unidades de costes energéticos adecuadas para comparar con los otros combustibles⁹³⁰, obtenemos los resultados presentados en la figura 590. Como podemos apreciar, por unidad de energía térmica liberada, el coste del uranio es significativamente inferior al de los combustibles fósiles⁹³¹, pero está sometido a una considerable volatilidad incluso con los relativamente bajos niveles de utilización de la energía nuclear a nivel mundial.

La volatilidad del precio del uranio es todavía superior si analizamos los valores mensuales. La figura 591 recoge los valores del precio del

Figura 589. Evolución histórica del precio del óxido de uranio empleado como materia prima para confeccionar el combustible nuclear. Fuente: 1948-1967 de la publicación GJO-100(82) del Departamento de Energía de Estados Unidos; 1968-2007 de TradeTech (Denver, Colorado).



⁹²⁹ A lo que habrá que añadir los costes propios del procesado para obtener los costes finales del combustible.

⁹³⁰ Considerando un "burnup", el análogo para el combustible nuclear al poder calorífico en los combustibles fósiles, de 50 GWd/tHM, que está asociado a un grado de enriquecimiento del uranio de 4,5%, y es por tanto equivalente a unos 117 GWh/kgU.

⁹³¹ Aunque a este coste del uranio se le deben añadir los costes de procesado para obtener el combustible nuclear, pero el total del coste del combustible nuclear sigue siendo significativamente inferior al coste de los combustibles fósiles.

uranio por unidad de energía térmica liberada para los años 2007 y 2010.

Estos gráficos nos proporcionan una idea del coste de la materia prima para confeccionar el combustible nuclear, y es preciso añadir los costes correspondientes al procesado para obtener el coste final del combustible nuclear⁹³². Existen múltiples variaciones y opciones en el ciclo del combustible nuclear, con opciones para reducir significativamente los requerimientos de uranio natural mediante el reciclado del plutonio y el uranio usado. La aplicación de estos procesos de reciclado reduce el coste de la materia prima, pero incrementa el coste del procesado, con un balance global que aumenta el coste total del combustible nuclear⁹³³.

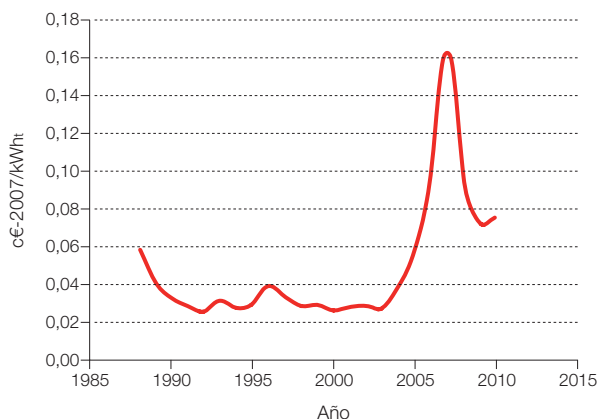
Desde el punto de vista del desarrollo de escenarios del combustible nuclear, la aproximación que vamos a adoptar va a ser partir

de un valor del orden de los costes actuales, establecer una tendencia inicial creciente de costes hasta alcanzar los valores necesarios para que el reprocesado resulte rentable, y a partir de este momento reducir la tasas anuales de inflación incremental para reflejar los valores residuales asociados al incremento de la demanda global, si hubiera una participación significativa de la tecnología nuclear en el BAU de las distintas economías del planeta. Sin embargo, los costes asociados al almacenamiento y disposición final de los residuos nucleares, debido a su mayor nivel de incertidumbre, no los vamos a incluir en el coste del combustible, sino junto a los costes de O&M, que además de los costes de disposición incluyen otros componentes de elevada incertidumbre y difícil valoración.

Por lo que respecta a las tasas de inflación incremental asociadas al incremento de la demanda sobre un recurso escaso, cabe esperar

Figura 590. Evolución histórica reciente del precio del uranio (promedios anuales) por unidad de energía térmica liberada (burnup = 50 GWd/tIHM) (el “burnup” expresa la liberación de energía térmica desde el combustible nuclear, y recibe su nombre a partir de la analogía con la combustión de combustibles, que viene aquí expresado como gigavatios-día por tonelada de metal pesado inicial- IHM en nomenclatura inglesa) (procesado a partir de datos:

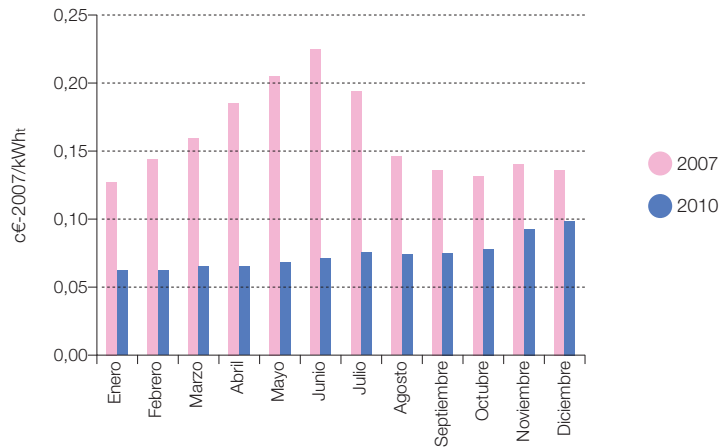
http://www.cameco.com/marketing/uranium_prices_and_spot_price/spot_price_5yr_history/)



⁹³² De hecho, para incluir el conjunto del ciclo del combustible nuclear, al coste del recurso natural (uranio), habría que añadir los costes de conversión, enriquecimiento, fabricación, y almacenamiento y disposición de los residuos finales, y en este último elemento es donde empiezan las incertidumbres del coste del combustible nuclear, para tener la seguridad de que no se están trasladando externalidades fuera del alcance de la valoración de costes del combustible nuclear.

⁹³³ El coste total del combustible en un proceso de reciclado de plutonio (MOX) puede llegar a ser casi cinco veces superior a uno de un solo paso del uranio (UOX) con los costes actuales del uranio, situándose en torno a 1 c€/2007/kWh. Para que el reprocesado resultara económicamente viable, la suma de los costes del uranio natural y del almacenamiento y disposición de los residuos debería subir por encima de los 0,7 c€/2007/kWh (MIT, “The future of nuclear power”, 2003).

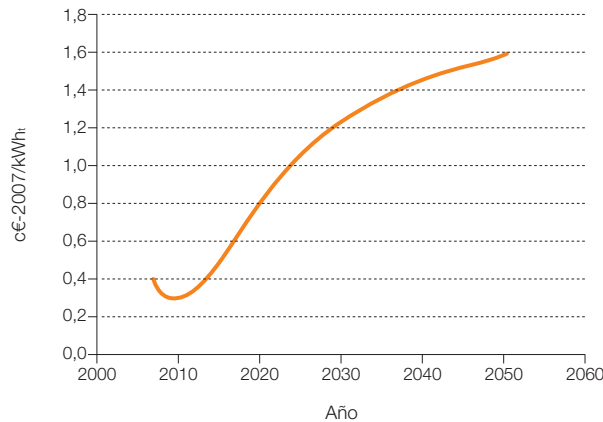
Figura 591. Evolución mensual del precio del uranio por unidad de energía térmica liberada en los años 2007 y 2010 (burnup = 50 GWd/tIHM) (procesado a partir de datos http://www.cameco.com/marketing/uranium_prices_and_spot_price/spot_price_5yr_history/).



que sean significativas en un contexto BAU que se apoyara en la energía nuclear de forma significativa a nivel global. En efecto, incluso con despliegues limitados⁹³⁴ de la energía nuclear como los correspondientes a cuadruplicar la potencia nuclear actualmente instalada (350 GW_e → 1.500 GW_e), que son

los manejados en referencias como (MIT, “The future of nuclear power”, 2003), ya conducen a agotar todas las reservas de uranio actualmente conocidas, por lo que cabe esperar una presión significativa sobre este recurso si la opción nuclear se adopta como válida a nivel global.

Figura 592. Escenario de costes del combustible nuclear adoptado.



934 Limitados desde el contexto de que si la energía nuclear se adopta como solución admisible para el contexto BAU, esta debería extenderse al conjunto de economías del planeta, y no quedarse limitada a las economías que actualmente usan la energía nuclear. Es decir, si la tecnología nuclear no es exportable al conjunto de las economías del planeta, entonces no constituye una solución BAU para ningún país, pues no se podría mantener esta desigualdad en el tiempo (sería excesivamente caro mantener esta desigualdad en el tiempo).

La figura 592 recoge el escenario adoptado para la evolución de los costes del combustible nuclear.

Pero los costes del combustible constituyen tan solo una pequeña parte de los costes de la electricidad proporcionada por las centrales nucleares, y se encuentra el grueso de las incertidumbres y externalidades no cubiertas en el resto de costes, esto es, en los costes de inversión y los de operación y mantenimiento, incluidos entre estos últimos los costes asociados a la disposición final de los residuos generados.

Por lo que respecta a los costes de inversión, la revisión de la literatura arroja un amplio abanico de estimaciones de costes de inversión: 3.400-5.200 €/2007/kW_e (DLR, [R]E, 2010), 2.500 €/2007/kW_e (MIT, "The future of nuclear power", 2003), 2100-2600 €/kW_e (AIE, ETP, 2010)... Encontrándose los costes de inversión finales de las últimas centrales construidas en el rango superior, después de haber ido incrementando sus costes de inversión a lo largo del proceso de construcción, lo cual constituye una clara muestra del carácter excesivamente conservador de las estimaciones de coste de inversión mostradas en las referencias. Pero es más, los costes de inversión de la tecnología nuclear no han llegado a su techo en las últimas plantas construidas, pues los requerimientos de seguridad sobre estas instalaciones seguirán creciendo a lo largo del tiempo, en el proceso de responder a las crecientes demandas de seguridad sobre un proceso intrínsecamente inseguro.

Y todavía mayor incertidumbre de costes nos encontramos en el marco de los costes de operación y mantenimiento (O&M), dónde en la actualidad se encuentran la mayoría de las externalidades sin valorar o infravalorados

en la estructura de costes de la generación nuclear:

- Gobernabilidad⁹³⁵.
- Seguridad de operación.
- Desmantelamiento
- Cobertura de responsabilidades ante incidencias⁹³⁶.
- Gestión de residuos.
- Prevención de atentados.
- Control de proliferación de armamento nuclear.
- Control de garantías de diseño y operación en un contexto de globalización de la tecnología nuclear.

Muchos de estos elementos resultan de difícil valoración, y no se puede esperar otra situación que la existencia de unas tasas de inflación incremental creciente a medida que la sociedad va exigiendo una cobertura más completa de estos aspectos. De hecho, ya en la actualidad se detecta una clara tendencia a infravalorar los costes de O&M de las centrales nucleares (MIT, "The future of nuclear power", 2003), que en algunas referencias cuantifican en torno a un 30% (Oak Ridge National Laboratory) incluso sin retener la gran mayoría de los aspectos que relacionábamos anteriormente, con lo que los costes de O&M se situarían ya en la actualidad⁹³⁷ en torno a los 2,1-4,4 c€/2007/kW_{he}.

En estas condiciones, el escenario de costes de O&M que vamos a adoptar parte de unos valores iniciales descompuestos⁹³⁸ entre un coste de O&M fijo de 80 €/2007/kW_e-a y un coste de O&M variable de 0,1 c€/2007/kW_{he}, a los que ya incorporaremos una internalización parcial de externalidades, y consideraremos una internalización gradual del resto de las externalidades no incorporadas en estos costes de O&M. Las figuras 593 y 594 reproducen los escenarios

⁹³⁵ En particular por lo que afecta a los requerimientos de transparencia y reflejo de la opinión de la sociedad en las decisiones y gestión de las instalaciones nucleares y sus incidencias.

⁹³⁶ Esta cobertura de responsabilidades debe extenderse más allá de las fronteras del país que decide utilizar la tecnología nuclear. En efecto, actualmente, esta cobertura de garantías normalmente no la asume completamente el promotor de la central nuclear, sino que requiere del apoyo de la administración central para hacer viable la inversión. Pero con todo, la extensión de la cobertura de responsabilidades se limita a una infravaloración de los daños potenciales y se queda dentro de las fronteras del país, mientras que un accidente nuclear traspasa las fronteras y por tanto incurre en costes y compromete recursos cuya valoración no se internaliza.

⁹³⁷ Es decir, con una escasa internalización de externalidades.

⁹³⁸ Algunos de los elementos de costes de O&M admiten una mejor correlación con la potencia instalada, mientras que otros están más relacionados con la generación de la central. Por este motivo resulta conveniente separar los costes de O&M en estos dos componentes.

de costes de O&M fijos y variables adoptados para las centrales nucleares. Evidentemente, estos escenarios de costes de O&M incluyen una gran incertidumbre, por la dificultad de asignar una valoración económica a estos aspectos, pero este grado de incertidumbre es una característica intrínseca de la tecnología nuclear, y la ausencia de valoración de estas externalidades no constituye

una alternativa admisible para establecer comparativas con otras tecnologías.

4.2.5 Hidrógeno

Por lo que respecta al hidrógeno, adquiere un papel relevante como vector energético en los mix de generación 100% renovables, y

Figura 593. Escenario adoptado para la evolución de los costes de O&M variables de las centrales nucleares.

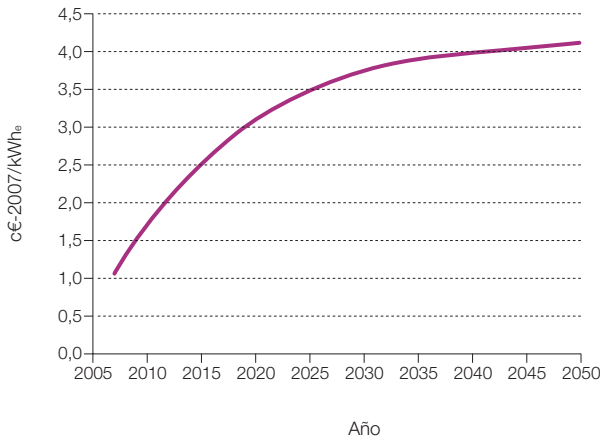
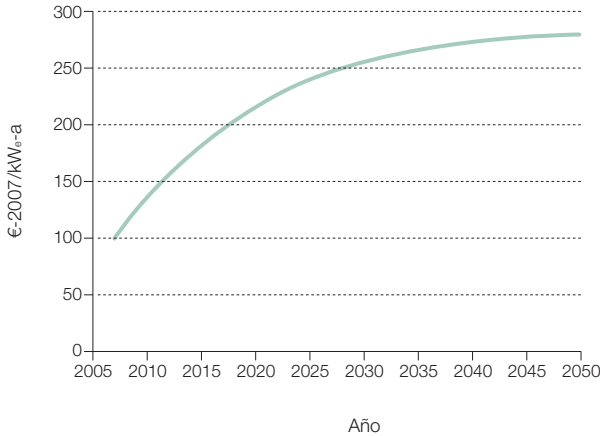


Figura 594. Escenario adoptado para la evolución de los costes de O&M fijos de las centrales nucleares.



contribuye de forma significativa a los costes totales del sistema energético mediante dos componentes principales:

- Los costes asociados a la generación, acondicionamiento y distribución del hidrógeno a partir de la electricidad renovable.
- Los costes asociados a la acumulación del hidrógeno requeridos para regular el sistema de generación y acoplar la capacidad de generación de hidrógeno (excedente de capacidad de generación del parque renovable instalado) con la demanda de hidrógeno.

Por lo que respecta a la producción del hidrógeno, dejando de lado los costes de producción de la electricidad empleada para generar el hidrógeno que ya se evaluarán por separado⁹³⁹, los costes están dominados por los costes de inversión del equipamiento necesario, y a su vez se ven muy afectados por el factor de capacidad con el que se usa el equipamiento de generación de hidrógeno.

En este sentido cabe comentar que el factor de capacidad resultante con el que se emplea la potencia de generación del hidrógeno a nivel del sistema energético total, resultará ser muy inferior al factor de capacidad que se considera en los estudios actuales sobre generación de hidrógeno, por lo que los costes por unidad de energía son superiores. El motivo de los bajos factores de capacidad del equipamiento de generación de hidrógeno en el marco del sistema energético total, es que la producción de hidrógeno se emplea como elemento de regulación del sistema energético, y requiere que se absorba la potencia disipada por la regulación del sistema eléctrico. Por tanto, aumentar el factor de capacidad del sistema de generación de hidrógeno, implica reducir el factor de capacidad de la potencia renovable instalada y,

por tanto, requeriría aumentar la potencia total de generación renovable instalada con el fin de cubrir la demanda, lo cual conllevaría unos costes totales del sistema de generación superiores a los asociados a emplear el equipo de producción de hidrógeno con bajo factor de capacidad. Esta situación difiere mucho de la habitualmente contemplada en los análisis de generación de hidrógeno, en los que el sistema analizado es una fracción muy pequeña del sistema energético total, y por tanto el objetivo es alcanzar elevados factores de capacidad del equipo de generación de hidrógeno, para reducir los costes específicos por unidad de energía del hidrógeno producido.

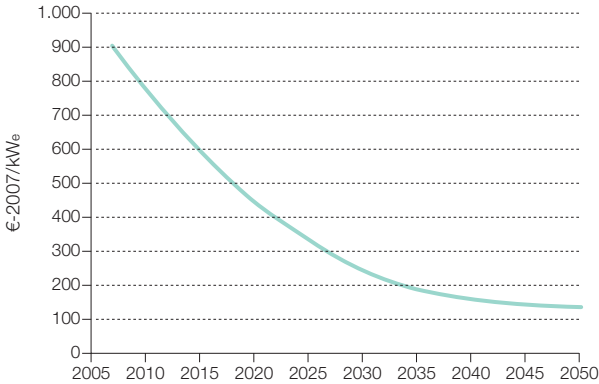
Queda fuera del alcance de este estudio analizar con mayor detalle las opciones de generación de hidrógeno a partir de la electricidad y, por tanto, el escenario de costes adoptado parte de unos costes representativos de la tecnología actual e introduce unas tasas de aprendizaje general para la tecnología, de tal forma que describe la evolución de costes que cabe esperar sin estar ligado a ninguna tecnología en concreto. Es decir, cabe esperar que la tecnología de generación de hidrógeno se vaya modificando al avanzar por la curva de aprendizaje. La figura 595 recoge el escenario considerado para la evolución de los costes de inversión asociados a la generación de hidrógeno.

Otro elemento relacionado con el hidrógeno relevante en cuanto a su impacto sobre la estructura de costes del sistema energético total es el coste asociado a los requerimientos de acumulación de hidrógeno.

Con el fin de acoplar la disponibilidad de electricidad residual procedente de la regulación del sistema eléctrico con la demanda de hidrógeno, y que por tanto la generación de hidrógeno pueda actuar como elemento de regulación del sistema energético total, es

⁹³⁹ Los costes de acondicionamiento y distribución del hidrógeno repercuten sobre el consumo total de electricidad necesario para la generación de hidrógeno, y su efecto está incorporado en el rendimiento total de generación de hidrógeno que hemos considerado.

Figura 595. Escenario de costes asociado a la inversión para generación de hidrógeno a partir de electricidad.



preciso disponer de una capacidad de acumulación de hidrógeno importante.

En el caso del contexto BAU, también se requiere una capacidad de acumulación de combustibles fósiles para acoplar la demanda y producción de estos combustibles, y el efecto económico de esta capacidad de acumulación no la incluimos al evaluar el coste de la energía en el contexto BAU. Por tanto, en algunas ocasiones, con el fin de no distorsionar la comparativa BAU frente a E3.0, tampoco incluiremos los costes de acumulación de hidrógeno en el resultado de los costes del sistema energético en el contexto E3.0. Sin embargo, la transición desde el contexto BAU al E3.0 requeriría habilitar esa capacidad de acumulación de hidrógeno, por lo que también resulta interesante tener cuantificado su efecto sobre la estructura de costes del sistema energético en el contexto E3.0.

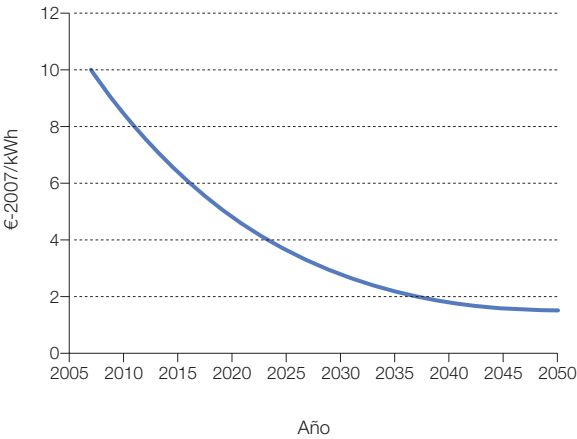
Existen muchas opciones tecnológicas para acumular el hidrógeno: en fase gaseosa, en fase líquida, en forma de hidruros metálicos, etc., y dentro de cada una de ellas hay variables de diseño a optimizar. Así, por ejem-

plo, en el caso de la acumulación en fase gaseosa, una de las principales variables a optimizar es la presión de almacenamiento, y se encuentran referencias⁹⁴⁰ en que esta presión varía entre 10 bar y 700 bar: a más presión, menor es el volumen del recipiente para una capacidad de acumulación energética dada, pero mayores son las exigencias estructurales para el recipiente.

Queda fuera del alcance de este estudio el profundizar o detallar las opciones de acumulación de hidrógeno, y por tanto vamos a adoptar un escenario genérico de evolución de costes que, partiendo de unos costes representativos de la situación actual, implemente unas tasas de aprendizaje del conjunto de la tecnología. Por tanto, más que estar ligado a una tecnología en particular, cabe esperar que las tecnologías de acumulación de hidrógeno se vayan modificando a medida que se recorre la curva de aprendizaje que da lugar a este escenario de evolución de costes. La figura 596 recoge el escenario de evolución de costes de acumulación de hidrógeno que hemos adoptado para este estudio.

940 Una presión tipo para aplicaciones estacionarias puede situarse en torno a 100 bar, mientras que las aplicaciones asociadas a la movilidad emplean presiones superiores. Pero no faltan propuestas de almacenamiento a presiones distintas, como la correspondiente a emplear las propias torres de los aerogeneradores para acumular hidrógeno (R. Kottenstette, J. Cotrell, "Hydrogen Storage in Wind Turbine Towers: Cost Analysis and Conceptual Design", NREL/CP-500-34851, 2003).

Figura 596. Escenario adoptado para los costes de acumulación de hidrógeno.



4.2.6 Otros recursos energéticos

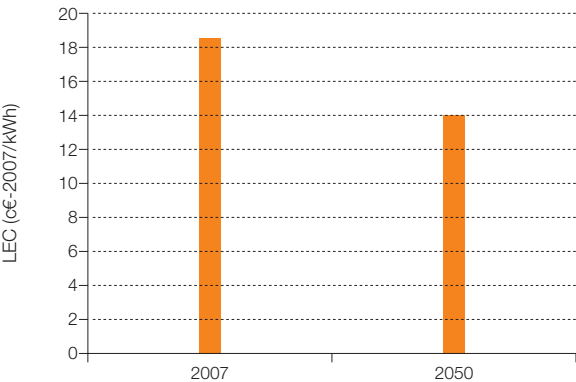
En este punto recogemos información relativa a otros elementos de coste que intervienen en los costes totales del sistema energético y que no han sido recogidos en otros apartados.

Por lo que respecta a la energía solar térmica, tanto en el contexto BAU como en el E3.0

participa en la cobertura de la demanda de energía térmica, tanto en el sector edificación como en el industrial. La figura 597 recoge los costes normalizados considerados para esta tecnología en los años extremos del periodo de tiempo considerado.

Por lo que respecta al coste de la biomasa⁹⁴¹, hemos adoptado el escenario del coste del recurso empleado en el estudio

Figura 597. Costes normalizados considerados para la energía solar térmica para aplicaciones de cobertura de la demanda térmica.



941 En este caso se trata de la biomasa primaria. Más adelante mostraremos los costes correspondientes a los biocombustibles procesados.

[R]E-2010 (GPI, 2010), que en términos de las unidades de coste energético que empleamos nosotros, aparece recogido en la figura 598. Como puede apreciarse, este escenario incorpora una inflación incremental para el coste de la biomasa, lo cual se justifica por la demanda creciente que cabe esperar sobre este recurso, que a pesar de ser

renovable, es relativamente escaso y tiene muchas aplicaciones potenciales. Al normalizar estos costes en el año inicial y final del periodo de tiempo considerado, y al incorporar los efectos de la inflación incremental sobre este recurso, obtendríamos los costes normalizados que se recogen en la figura 599.

Figura 598. Escenario de evolución del coste de la biomasa. Adaptado de (GPI, [R]E, 2010).

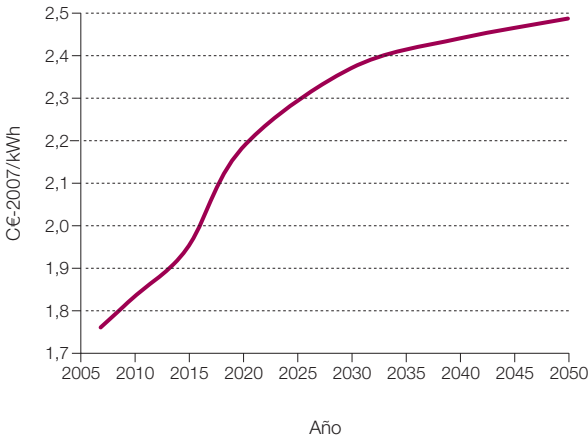


Figura 599. Coste normalizado de la biomasa directa en los años inicial y final del periodo de tiempo considerado.

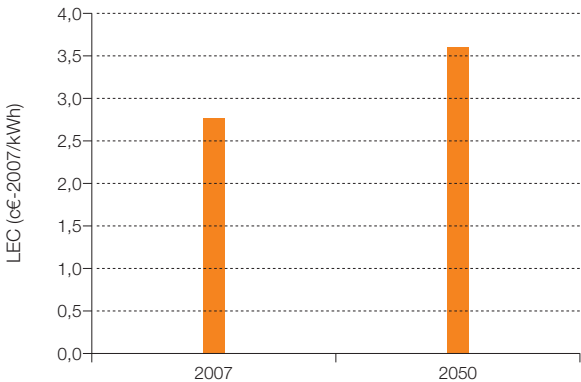
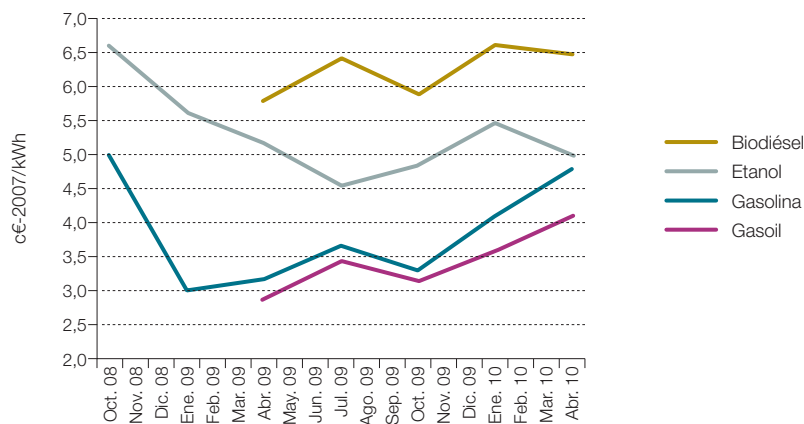


Figura 600. Evolución reciente de los costes de los biocombustibles procesados. (adaptado de: Ricardo Guerrero, Gustavo Marrero, José M. Martínez-Duart, Luis A. Puch, “Biocombustibles líquidos: Situación actual y oportunidades de futuro para España”, DD 19/2010, Fundación Ideas para el Progreso, 2010).



Por lo que respecta a los costes de los biocombustibles procesados, la figura 600 recoge la evolución histórica reciente comparada con los costes de la gasolina y el gasóleo.

En el marco de este estudio, hemos empleado un único escenario de costes para todos los biocombustibles procesados, que representa un promedio del mix de biocombustibles que se acaban usando para cubrir la

Figura 601. Costes de los biocombustibles procesados, sin normalizar y en términos normalizados.

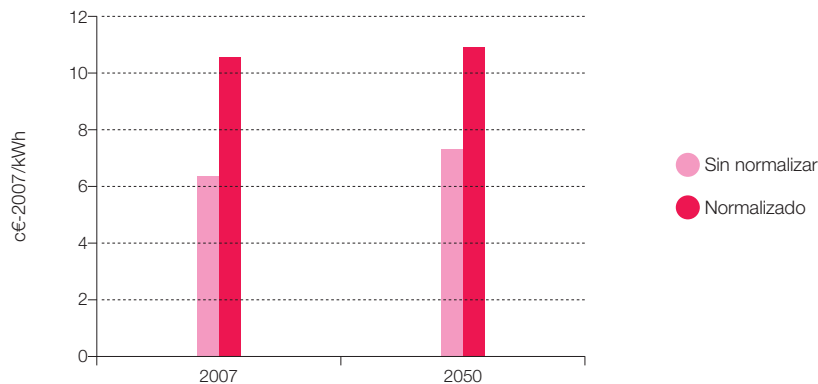
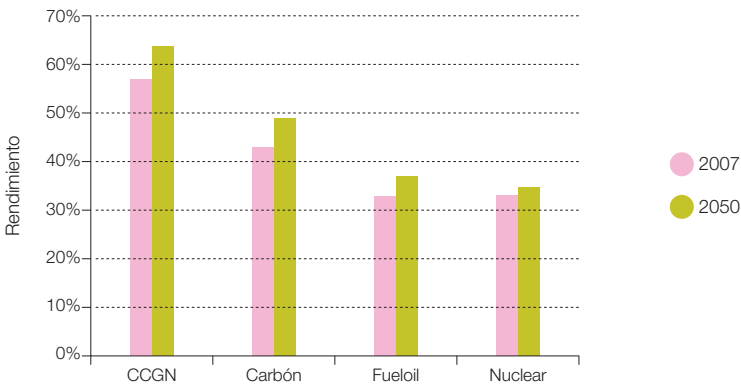


Figura 602. Rendimientos considerados para las centrales de generación eléctrica en el contexto BAU al principio y final del periodo considerado para el desarrollo del escenario.



demanda de este producto. El escenario se ha confeccionado partiendo de los costes de la materia prima, los rendimientos tipo de transformación, y costes de procesado característicos. Debido a la demanda creciente que cabe prever sobre la biomasa, así como a la limitación del recurso, hemos introducido unas tasas de inflación incremental que sin embargo quedan un tanto diluidas por la evolución de los costes de procesado. En la figura 601 recogemos los costes correspondientes a los años extremos del periodo de tiempo considerado en el desarrollo de los escenarios, tanto en términos del coste para ese año, como en términos del coste normalizado durante un periodo de 30 años (a partir del año considerado) teniendo en cuenta la inflación incremental a la que se ve sometido este recurso.

4.2.7 Costes normalizados de generación eléctrica fósil y nuclear

En este punto recogemos los costes normalizados de la electricidad para el contexto

BAU. Estos costes incluyen los escenarios de costes anteriormente presentados para los combustibles, operación y mantenimiento, así como las correspondientes tasas de inflación incremental, y se encuentran normalizados empleando un valor del interés del dinero del 8%, y una tasa de inflación general del 3,5%/a, así como una vida útil de las instalaciones de 30 años para las centrales de ciclo combinado de gas natural (CC GN) y fueloil, de 35 años para las centrales de carbón, y de 40 años para las centrales nucleares⁹⁴².

Los rendimientos considerados para las distintas centrales de generación eléctrica BAU⁹⁴³ son los recogidos en la figura 602.

Respecto a los costes de inversión, la figura 603 recoge los valores considerados. Para estos costes de inversión no hemos considerado una evolución con el tiempo, aunque para la mayoría de ellas, elementos como la madurez tecnológica actual, el incremento de rendimiento proyectado, y probablemente la reducción del mercado global por transición de parte de las economías mundiales hacia

942 Consideramos de forma conservadora una vida útil de 40 años para las nuevas centrales nucleares, si bien las centrales nucleares actualmente existentes en España fueron diseñadas para una vida útil de 30 años.

943 Para el caso del carbón, los rendimientos presentados son sin incluir la captura de CO₂ (en el caso de incluirla los rendimientos serían inferiores). Posteriormente se añadirá un coste del CO₂, que si estuviera bien puesto sería equivalente al incremento del coste de generación asociado a la implementación de la captura y almacenamiento de CO₂.

el contexto E3.0, podrían recomendar el proyectar un incremento de costes de inversión con el tiempo.

Mención aparte merece la tecnología nuclear. En este caso no se trata de una tecnología madura, dados los requerimientos de incremento de seguridad que siguen creciendo con el tiempo, y que conducirían a un incremento en los costes de inversión, así como a

la baja tasa de construcción de centrales en los últimos años, que en caso de incrementarse podría conducir a una reducción de los costes de inversión. En esencia vamos a asumir que estas dos tendencias se equilibran, de tal forma que los avances por la curva de aprendizaje compensan a los crecientes requerimientos de seguridad. El valor del coste de inversión adoptado se sitúa en el rango medio de los valores recogidos en

Figura 603. Costes de inversión considerados para las distintas tecnologías del contexto BAU.

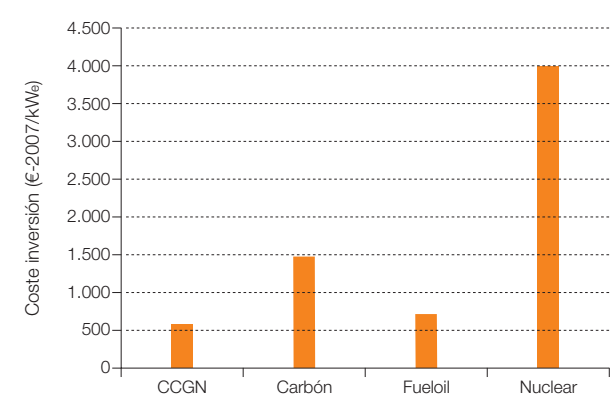
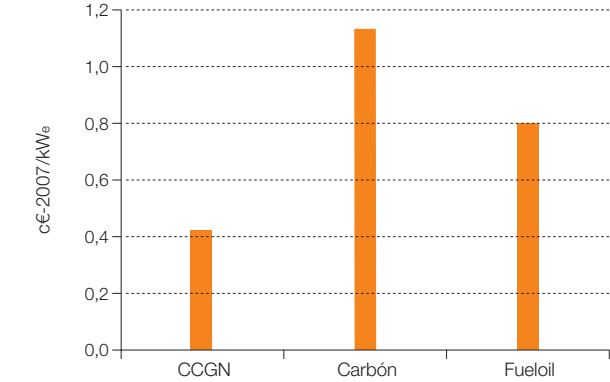


Figura 604. Costes de O&M, excluyendo los asociados a las emisiones de CO₂, adoptados para las tecnologías de combustión fósil (contexto BAU).



la bibliografía reciente, y resulta probablemente muy conservador por lo que se refiere a las experiencias de las últimas centrales en construcción.

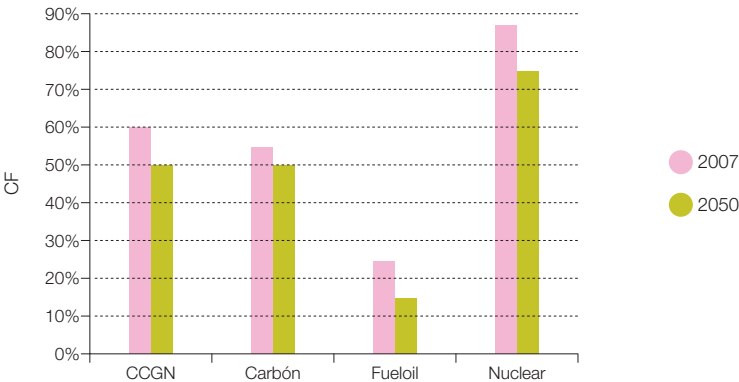
Por lo que respecta a los costes de O&M de las tecnologías de combustibles fósiles, los valores adoptados, excluyendo los costes asociados a las emisiones de CO₂ ya documentados en otro apartado, son los que mostramos en la figura 604. Por lo que respecta a los costes de O&M de las centrales nucleares ya han sido presentados en una apartado anterior.

Por lo que se refiere a los factores de capacidad (CF) con los que operan estas tecnologías en el sistema eléctrico, planteamos una reducción⁹⁴⁴ de los mismos a lo largo del tiempo, ocasionada tanto por la paulatina integración de generación renovable (incluso en el contexto BAU), como a la limitación en la activación de mecanismos de gestión de la demanda dentro del contexto BAU.

Aunque los factores de capacidad que hemos adoptado para las centrales de ciclo combinado y de carbón pueden parecer bajos⁹⁴⁵, realmente son elevados en relación a las condiciones en que estas centrales están operando en los últimos años. En efecto, la figura 606 recoge los factores de capacidad con los que han operado estas centrales desde el año 2002 en que se empezaron a incorporar los ciclos combinados. Como podemos ver se observa una fuerte y mantenida caída de los factores de capacidad con los que han operado estas centrales desde los años 2007-2008, coincidiendo con el impulso al despegue de las energías renovables en España.

Por tanto, los valores de los factores de capacidad considerados para los ciclos combinados y las centrales de carbón los podemos considerar conservadores, en el sentido de que los LEC⁹⁴⁶ de estas tecnologías con los CF realmente existentes en la actualidad serían más elevados. La hipótesis implícita en este planteamiento para los factores de capacidad

Figura 605. Factores de capacidad con los que operan las centrales de generación del mix BAU.



944 Cabe resaltar cómo los factores de capacidad asumidos para las centrales de ciclo combinado son incluso superiores a los registrados en la actualidad.

945 Ciertamente son bajos para los valores tradicionalmente empleados para evaluar la viabilidad económica de estas centrales, y probablemente bajos también para los valores empleados por los inversores que decidieron empezar a introducir los ciclos combinados por el sistema de generación español a principios del siglo XXI.

946 LEC (levelized electricity cost) es el coste normalizado de esa electricidad producida (también se puede extender a otro tipo de energía final). El proceso de normalización consiste en trasladar al instante inicial todos los costes incurridos para la generación de esa electricidad a lo largo de la vida útil de la instalación, teniendo en cuenta la variación del valor del dinero con el tiempo, de tal forma que quede recogido en un único parámetro económico el efecto de elementos tan dispares como los costes de inversión inicial o los costes recurrentes de los combustibles empleados, y la O&M de la instalación. De esta forma es posible establecer una comparación directa entre tecnologías con coste de inversión relativamente bajo y elevados costes de operación (como las centrales de combustibles fósiles), y las instalaciones de energías renovables con costes de inversión relativamente elevados, pero costes de operación muy bajos e independientes de los procesos de inflación a los que se ven sometidos los combustibles fósiles.

Figura 606. Evolución de los factores de capacidad de las centrales de carbón y ciclo combinado en el sistema eléctrico peninsular desde que se empezaron a introducir ciclos combinados en el sistema (procesado a partir de datos REE).

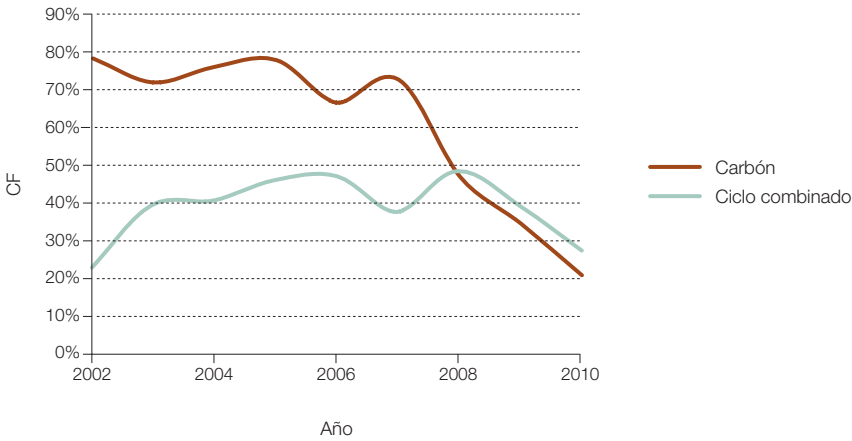
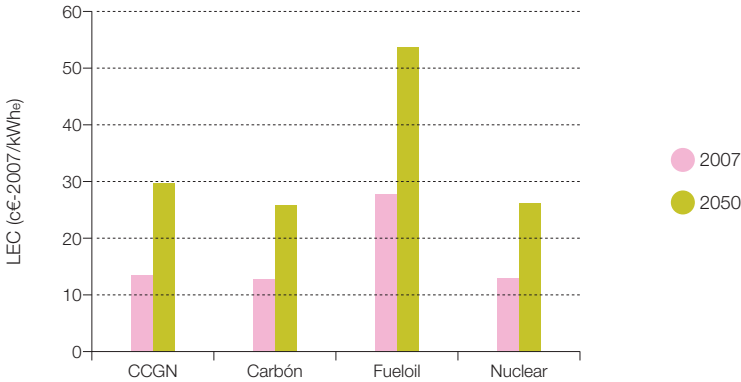


Figura 607. Costes normalizados de generación eléctrica con las tecnologías del contexto BAU en los años extremos del periodo temporal considerado para el desarrollo de los escenarios.



de los ciclos combinados y centrales de carbón, es que la gran caída de estos indicadores en los últimos años ya representa el inicio de la transición hacia el contexto E3.0, y por tanto no representa el contexto BAU.

En estas condiciones, los costes totales (incluyendo costes de emisiones de CO₂)

normalizados asociados a la generación de electricidad con las tecnologías del mix BAU son los recogidos en la figura 607. Las figuras 608 a 610 muestran la descomposición entre costes de generación y costes de emisiones para cada una de las tecnologías fósiles.

Figura 608. Estructura del coste normalizado de generación de las centrales de ciclo combinado del contexto BAU.

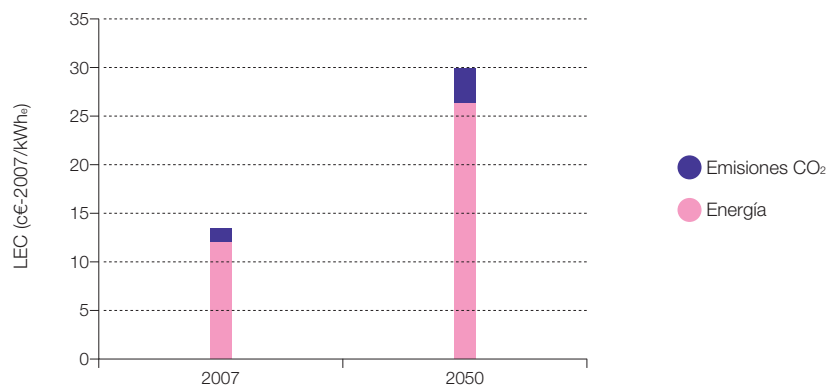


Figura 609. Estructura del coste normalizado de generación de las centrales de carbón del contexto BAU.

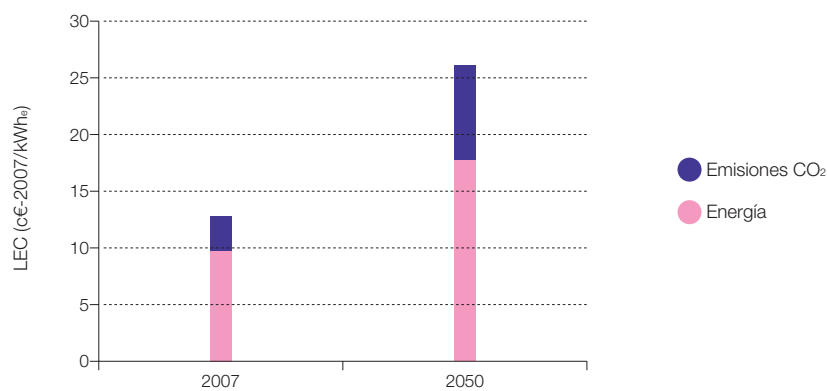
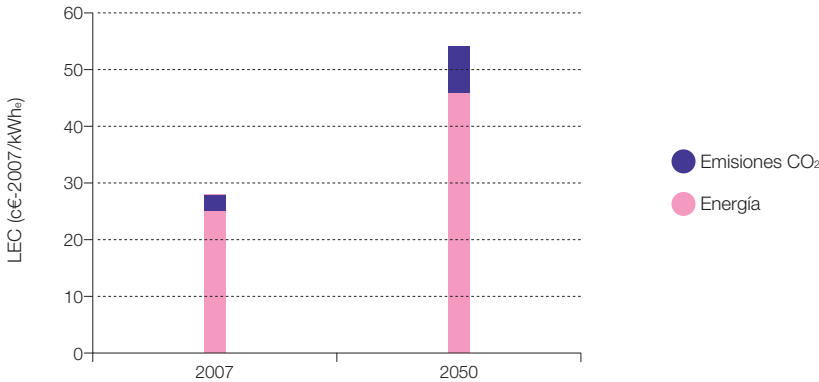


Figura 610. Estructura del coste normalizado de generación de las centrales de fueloil del contexto BAU.



4.3 Tratamiento de la evolución temporal del coste

Los costes de la energía obtenida con un mix determinado evolucionan a lo largo del tiempo⁹⁴⁷. En el caso de las renovables el elemento principal en la evolución de los costes es la reducción de los costes de inversión al progresar estas tecnologías por sus curvas de aprendizaje, proporcionando unos costes decrecientes de la unidad de energía generada. Para el caso de las energías de origen fósil, el elemento principal de evolución de sus costes es la inflación incremental en los combustibles, consecuencia directa de constituir un recurso escaso y limitado sometido a una demanda galopante, lo que conduce a unos costes crecientes de la unidad de energía. En el caso de la energía nuclear, tanto los costes de inversión (por motivos de demanda creciente de seguridad), como los de los combustibles (por una inflación incremental por el mismo motivo que los combustibles fósiles), y los de operación y mantenimiento (por los requerimientos de seguridad e internalización del impacto futuro de sus residuos), contribuyen a producir unos costes

crecientes de la unidad de energía a lo largo del tiempo.

En el informe R100% (GP, 2007) para ilustrar y enmarcar esta variación temporal de los costes, proporcionamos los costes normalizados de la energía (LEC) correspondientes a una instalación (o a todo un mix de generación⁹⁴⁸) construida en 2003 y otra construida en 2050, es decir, en los instantes extremos del periodo de tiempo considerado en el escenario. Los costes en 2003 son indicativos de los costes iniciales asociados al desarrollo de estos modelos basados en energías renovables, mientras que los costes en 2050 son indicativos de los costes estables que perderán una vez alcanzada la madurez tecnológica y comercial de las tecnologías empleadas. El promedio aritmético entre los costes en 2003 y 2050 proporcionaba una primera aproximación a los costes promedios durante el periodo considerado.

En este informe hemos procedido de forma parecida, proporcionando los costes asociados al inicio del periodo de análisis (año 2007⁹⁴⁹) y al final del periodo de análisis

947 Aunque se expresen en dinero constante para evitar el efecto de la inflación.

948 Para el caso del sistema energético basado en energías renovables.

949 Respecto al estudio R100% (GP, 2007), en los años transcurridos para marcar el inicio del periodo de análisis (de 2003 al 2007), ya han visto un avance significativo de algunas tecnologías a lo largo de sus curvas de aprendizaje, por lo que los costes al inicio del periodo de análisis son sensiblemente inferiores en este estudio que en el R100%.

(año 2050). Sin embargo, hemos querido profundizar más en la evaluación de los costes promedio a lo largo del periodo considerado para proporcionar una información más precisa de los costes asociados al periodo de implementación del modelo energético basado en energías renovables. En este punto exponemos la metodología empleada para elaborar este promediado. Sin embargo, debemos insistir en que más allá del año 2050, los costes estables que prevalecen son los correspondientes al año 2050, que en el marco de este estudio representan la madurez tecnológica y comercial de todas las tecnologías consideradas. Por tanto, los beneficios a largo plazo de la transición hacia un modelo energético, basado en energías renovables, son considerablemente superiores a los indicados por el coste promedio en el periodo de desarrollo, y quedan mejor caracterizados por los costes asociados al final del proceso del desarrollo tecnológico y comercial de las tecnologías consideradas, es decir, a los costes en el año 2050 por lo que respecta al contexto de este estudio.

Partiendo de los costes normalizados de la unidad de energía (LEC) expresados en dinero constante (c€-2007/kWh) para el inicio (año 2007: LEC_{2007}) y final (año 2050: LEC_{2050}) del periodo considerado, vamos a adoptar un escenario de evolución de estos costes. La evolución real de los LEC entre los años 2007 y 2050 dependerá del ritmo de implementación y progreso a nivel global de las tecnologías consideradas, y por tanto va mucho más allá de las consecuencias del modelo energético que se desarrolle en España. Por tanto, el escenario de transición de costes considerado debe entenderse tan solo como una primera aproximación para aproximar el coste promedio en el periodo considerado.

Por lo que respecta a estos escenarios de transición, vamos a adoptar dos: uno para los costes decrecientes de las energías renovables (modelo energético del contexto E3.0), y otro para los costes crecientes de las energías fósiles y nucleares (modelo energético del contexto BAU). La diferenciación entre estas dos situaciones es debida a que los mecanismos de evolución de costes en ambas son distintos. Así, en el caso de las energías renovables, es de esperar una transición gradual que tiende a una saturación final desde los costes iniciales hacia los finales, como respuesta a la progresión por la curva de aprendizaje, mientras que en el caso de las energías fósiles y nuclear cabe esperar un retraso inicial en la transición de costes para posteriormente pasar por una etapa intermedia de mayor velocidad de transición. La figura 611 recoge los dos escenarios de transición considerados. Denominando $A(t)$ al escenario de transición, el coste de la energía en cada instante a lo largo del periodo de tiempo considerado podrá obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$LEC(t) = (1-A(t)) \cdot LEC_{2007} + A(t) \cdot LEC_{2050}$$

Para el caso de las tecnologías fósiles, más dominadas por los costes de combustible, este $LEC(t)$ ya puede ser representativo del LEC promedio del parque de la tecnología en el año considerado, que denominaremos $LEC_m(t)$. Sin embargo, para las tecnologías renovables fuertemente dominadas por los costes de inversión, el valor medio del LEC correspondiente al parque operativo en un instante determinado, deberá obtenerse por medio del promedio ponderado de las centrales existentes en un momento concreto. Para estos efectos vamos a considerar que el parque de una tecnología dada, en cada instante de tiempo, está formado por las instalaciones construidas durante los 20 años

Figura 611. Escenarios de transición de costes. Representan el peso relativo del coste en el final del periodo considerado sobre el coste promedio.

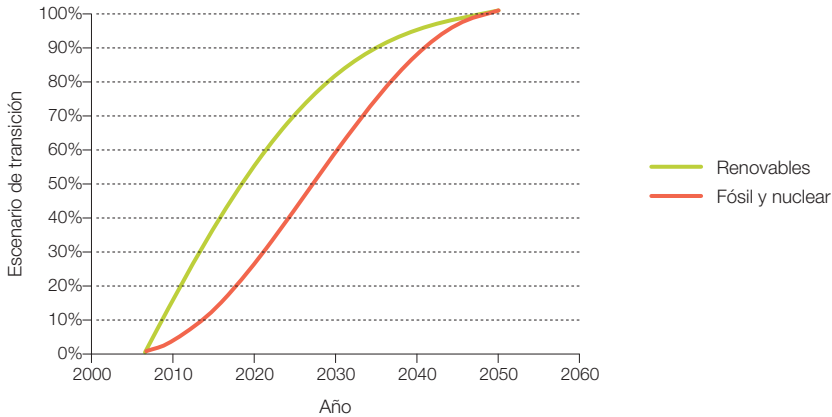
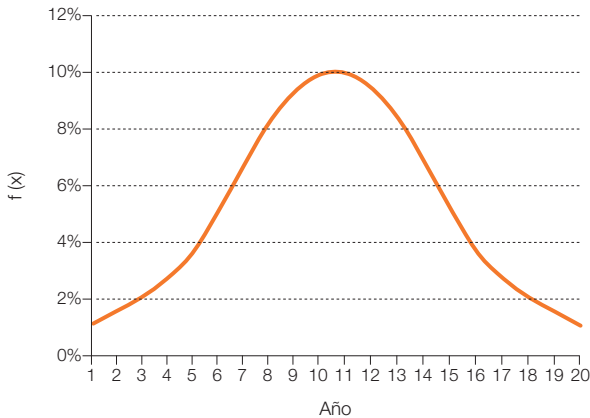


Figura 612. Función de distribución del año de instalación del parque actual de una tecnología dada a lo largo de los 20 años anteriores.



anteriores, de tal forma que el LEC_m podrá obtenerse mediante la siguiente expresión, donde $f(x)$ representa la función de distribución de la instalación de centrales de la tecnología considerada a lo largo de los 20 años anteriores⁹⁵⁰, que vamos a considerar representado por la figura 612.

Por último, el valor promedio del LEC en un periodo de tiempo dado (T), vendrá dado por la siguiente expresión:

$$LEC_{promedio} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T LEC_m(t) \cdot dt$$

$$LEC_m(t) = \int_{t-20}^t LEC(x) \cdot f(x) \cdot dx$$

⁹⁵⁰ Es decir, el valor de "f" en un año dado representa el peso porcentual del parque que se instaló en ese año.

Una vez desarrollados los distintos escenarios de cobertura de la demanda, presentaremos resultados tanto para los LEC_{2007} , LEC_{2050} , $LEC_m(t)$ y $LEC_{promedio}$, así como la discusión correspondiente a estos resultados.

4.4 Sobre el coste del ahorro

El coste asociado al despliegue de eficiencia es un aspecto importante al que ya nos hemos referido anteriormente en este informe: dentro del capítulo dedicado a la demanda del sector edificación, desarrollamos un análisis técnico-económico asociado al incremento de espesor de aislante en las paredes de un edificio, y concluiremos que el nivel óptimo de despliegue de ahorro estaba en ese caso asociado a un coste del negavatio del orden de 1-2 c€/2007/kWh, mientras que otras referencias (AIE, ETP, 2010) apuntan al incremento del espesor de aislante como una de las medidas de eficiencia con mayor coste del negavatio dentro del sector edificación: es decir, para la mayoría de las medidas de eficiencia dentro de este sector, los costes del negavatio cabe esperar que se sitúen por debajo de 1 c€/2007/kWh. Así mismo, en ese punto también mostramos cómo en el caso de diversas medidas de eficiencia, el coste del negavatio podía ser negativo como consecuencia de las estructuras de precios de los productos disponibles en el mercado, cuyo volumen de mercado sigue los requerimientos regulatorios. Otras referencias, como (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009), también muestran como muchas de las medidas de eficiencia que podemos desplegar en sectores como la edificación tienen unos costes negativos⁹⁵¹.

Otro de los elementos característicos de la economía del ahorro, que mostrábamos en el capítulo dedicado al sector edificación, es la

saturación a la que se pueden ver sometidas algunas medidas de ahorro, generando un óptimo técnico-económico a partir del cual el coste del ahorro se incrementaba de forma importante como consecuencia de una inversión creciente, sin prácticamente beneficio energético marginal. Al superar estos puntos óptimos en el despliegue de eficiencia es cuando, por lo general, entramos en la región en la que nos debemos empezar a preocupar por el hecho de que el despliegue de eficiencia conduzca a un coste total del sistema energético, superior al correspondiente a cubrir esta demanda marginal por otros medios.

En el caso del contexto E3.0, la alternativa a una inversión en eficiencia no es tan solo la inversión en capacidad adicional de generación (que por lo general tendrá unos costes superiores al despliegue de eficiencia hasta llegar a su zona de saturación), sino que también tenemos disponible la respuesta de la demanda para acomodar la disponibilidad del sistema de generación. Así, el uso de esa electricidad “residual” procedente de los requerimientos de regulación del sistema eléctrico, cuando no exista otra opción de integración de la misma dentro del sistema energético⁹⁵², constituye una alternativa de muy bajo coste⁹⁵³ al despliegue de eficiencia adicional.

Otro elemento a tener en consideración al contrastar el coste del ahorro de una medida o conjunto de medidas dadas, es el grado de internalización de externalidades en el coste de referencia de cubrir esos negavattos con generación adicional. Esto, a su vez, está estrechamente relacionado con la existencia de unas condiciones de contorno que nos impone el medio físico en el que se desarrollan las actividades de nuestros sistemas, y que en la actualidad se expresan de forma muy contundente en forma de restricciones impuestas

⁹⁵¹ Si bien hay que tener precaución al interpretar estos resultados. Más abajo profundizaremos sobre esto.

⁹⁵² Por ejemplo, si ya se tiene cubierta toda la demanda de hidrógeno.

⁹⁵³ Especialmente si ya se encuentra desplegada la infraestructura de inteligencia para activar la respuesta de la demanda.

por el sistema climático, y en restricciones de disponibilidad de recursos en los que apoyamos la evolución de nuestros sistemas, especialmente cuando imponemos la condición básica de sostenibilidad de que estos recursos sean repartidos de forma equitativa entre todos sus potenciales usuarios (presentes y futuros). En este contexto, no existen cotas superiores al coste permisible del negavatio siempre que esos negavatos sean imprescindibles para adaptarnos a las exigencias de las condiciones de contorno a las que estamos sometidos.

En este estudio, uno de los principales indicadores que hemos adoptado para describir el desempeño de las distintas opciones de cobertura de la demanda es el coste total del conjunto del sistema energético para unas condiciones de demanda dadas. Para el caso del contexto E3.0, con un fuerte despliegue de medidas de eficiencia, el coste que obtenemos es el del total del sistema energético para cubrir esa demanda, pero no incluye el coste de las inversiones necesarias para materializar ese despliegue de eficiencia en el lado de la demanda. Sin embargo, el hecho de disponer de una referencia de costes totales en el contexto de demanda BAU con la que comparar los costes totales asociados al despliegue de eficiencia en el contexto E3.0, nos permite evaluar un valor máximo del coste del ahorro (coste del negavatio) asociado al despliegue de medidas de eficiencia para que el coste total en el contexto E3.0, incluyendo el despliegue de eficiencia, se mantenga por debajo del coste total⁹⁵⁴ del sistema energético en el contexto BAU. Tal y como mostraremos más adelante a lo largo de este informe, esta cota del coste del ahorro depende del año en que se evalúe y del tipo de sistema de generación empleado para cubrir la demanda (mix BAU o mix 100% renovable), pero se encuentra en el rango de

15-25 c€/2007/kWh, un valor muy superior al del coste correspondiente al negavatio en la zona de despliegue de eficiencia óptimo para la gran mayoría de medidas de ahorro.

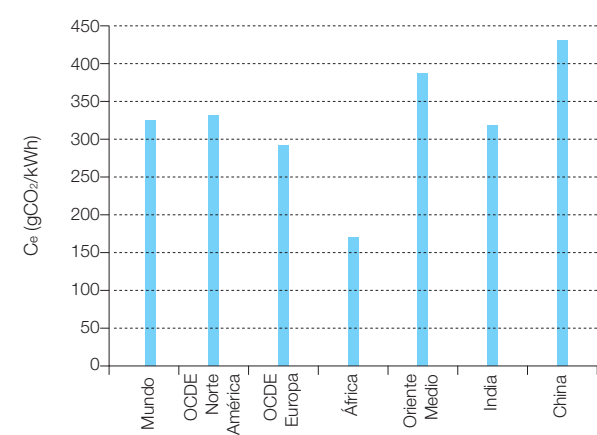
Conviene ahora detenerse un poco a analizar la información disponible en la bibliografía sobre el coste del ahorro para, por un lado, ampliar el abanico de ejemplos del coste del negavatio, y por otro lado adquirir una mejor perspectiva de cómo y cuándo se pueden comparar los resultados presentados en este informe con los que se encuentran en la bibliografía.

En la bibliografía reciente, la mayor parte de la información relativa al coste del ahorro la encontramos embebida dentro de las evaluaciones de los costes de reducción de emisiones, y por tanto, más que referidas al coste del negavatio, se refieren al coste de la reducción de emisiones. El primer elemento para deducir a partir de estos resultados el coste del negavatio es el conocer la intensidad en carbono del sistema energético considerado, información que a menudo no se encuentra disponible en las referencias que proporcionan costes de eliminación de CO₂. Este coste de emisiones varía fuertemente según a qué región nos estemos refiriendo (la figura 613 muestra valores para distintas regiones del mundo), así como de si se trata del conjunto del sistema energético o de una parte del mismo⁹⁵⁵. Además, la intensidad energética del sistema energético irá variando a lo largo de la vida útil de la medida de eficiencia, por lo que el coste asociado a su ahorro de emisiones también cambiará. Por el contrario, el coste del negavatio, al estar principalmente dominado por los costes de inversión, se mantendrá prácticamente constante a lo largo de toda la vida útil de la medida de eficiencia. Pero es más, los costes del ahorro en términos de emisiones habitualmente

⁹⁵⁴ Nótese que para el caso del contexto BAU, el coste total del sistema energético tampoco incluye el coste de los equipos terminales de la demanda, y por tanto este máximo del coste del ahorro obtenido por comparación de los costes totales BAU y E3.0, constituye realmente una cota inferior del coste máximo permisible para que no se incurriera en un incremento del coste total del sistema energético.

⁹⁵⁵ Por ejemplo, para la generación de electricidad el coeficiente de emisiones sigue estando por encima de 500 gCO₂/kWh en muchas regiones del mundo.

Figura 613. Coeficiente de emisiones del sistema energético, referido a energía final, en distintas regiones del mundo para el año 2009. Procesado a partir de (GPI, [R]E, 2010).



descuentan el ahorro asociado a la reducción del consumo BAU, por lo que son fuertemente dependientes de la evolución de los costes de la energía en el contexto BAU.

Por todos estos motivos, resulta, por lo general, complicado deducir a partir de los costes del ahorro, en términos de emisiones, los costes del ahorro en términos energéticos (negavatio), y esta es una de las razones por la que nosotros hemos optado por expresar los resultados en términos del coste del negavatio, y en poner el foco de atención en la evaluación de los valores límite que se pueden permitir en el coste del negavatio para que el coste total del sistema energético en el contexto E3.0 quede por debajo del correspondiente al contexto BAU.

En el informe de mitigación del 4º informe del IPCC (IPCC, 2007) aparece la recopilación de la cuantificación del potencial de reducción de emisiones en los distintos sectores que reproducimos en la figura 614. El potencial total de reducción de emisiones por debajo de 100 \$-2000/tCO₂ que indican, puede llegar

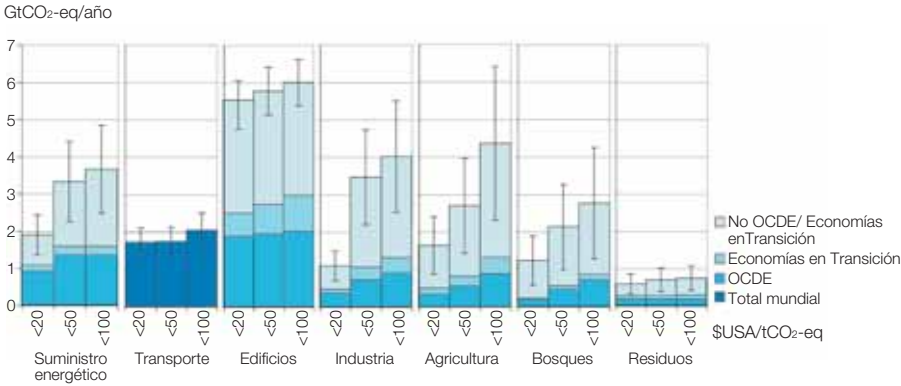
a ser del orden del 50% de las emisiones totales en el año 2030. Como podemos observar, el sector edificación es el que ofrece un mayor potencial de reducción de emisiones. De hecho, el 80% de las medidas de reducción de emisiones en el sector edificación son de coste negativo⁹⁵⁶.

El primer elemento a tener en cuenta en relación a estos resultados es que el coste presentado, por lo general, se refiere al coste neto en el ciclo de vida, y por tanto incluye los ahorros asociados a reducir el consumo de energía respecto a un escenario BAU como consecuencia de la aplicación de la medida de ahorro. Esta aproximación, si bien es muy apropiada para obtener un indicador del coste neto en el ciclo de vida, tiene el inconveniente de que al no estar directamente valorado el coste del ahorro, sino expresado de forma relativa al coste BAU, los resultados son fuertemente dependientes de las hipótesis que se hagan sobre la evolución del precio de la energía en el contexto BAU⁹⁵⁷. Aunque no es posible obtener una traducción exacta de estos resultados a costes del ahorro, el nivel

956 En términos de coste neto en el ciclo de vida, y por tanto incorporando los efectos del ahorro producido por la reducción de consumo de energía. Ver discusión más abajo.

957 De hecho, la mayoría de estos estudios adoptan los escenarios de la AIE sobre la evolución del precio del petróleo, y por tanto están asociados a suponer que el precio del petróleo se mantiene por debajo de los 50-60 \$/barril.

Figura 614. Estimación del potencial de reducción de emisiones por rangos de costes (IPCC Fourth Assessment Report (AR4), WG III, “Mitigation of Climate Change”, 2007).



de coste de las emisiones de 20 \$-2000/tCO₂ bajo el que se localiza el 80% del potencial de reducción de emisiones según esta referencia, se corresponden aproximadamente⁹⁵⁸ a 5,5 c€-2007/kWh.

En (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009) encontramos un estudio más reciente sobre los costes y el potencial asociado a la reducción de emisiones. En esta referencia se manejan dos indicadores, uno de ellos, el coste de reducción de emisiones, es el mismo anteriormente comentado, y expresa el valor neto a lo largo del ciclo de vida de la inversión de la diferencia de costes entre la medida de eficiencia y la opción BAU. Por tanto, al tratarse de una evaluación relativa, es fuertemente dependiente sobre las hipótesis que se hagan en relación a los precios de la energía en el contexto BAU⁹⁵⁹. El otro indicador empleado es el que denominan intensidad de capital de las medidas de reducción, y está más cercano al coste del ahorro en el sentido de que no incorpora el coste ahorrado del contexto BAU, pero por un lado no está normalizado, y por otro no incorpora los costes de O&M de la

medida de eficiencia considerada. En las figuras 615 y 616 reproducidas de esta referencia podemos observar las curvas de reducción de emisiones y de intensidad de capital. Tal y como se observa en esta referencia, el orden de mérito de las medidas según ambos indicadores es diferente, lo cual puede condicionar el orden con el que se apliquen las medidas de eficiencia según el criterio empleado.

Según (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009), el despliegue de todas las medidas de eficiencia indicadas en estas figuras permitiría seguir un escenario de concentración de GEI con un pico de 480 ppm CO_{2,eq} y una estabilización en torno a 400 ppm CO_{2,eq}, con un coste total inferior al 1% del PIB.

Procesando el indicador de la intensidad de capital, que como hemos comentado es el más cercano al coste del negavatio, los resultados de esta referencia indican que el coste máximo del negavatio sería:

- Para el 50% del desarrollo del potencial: 0,17 c€-2007/kWh.

⁹⁵⁸ Usando un coeficiente de emisiones global del sistema energético como el correspondiente al año 2007 para el promedio del mundo.
⁹⁵⁹ En esta referencia se usa el escenario de la AIE con un coste del barril de petróleo de 60 \$-2005/barril.

- Para el 75% del desarrollo del potencial:
0,52 c€/2007/kWh.

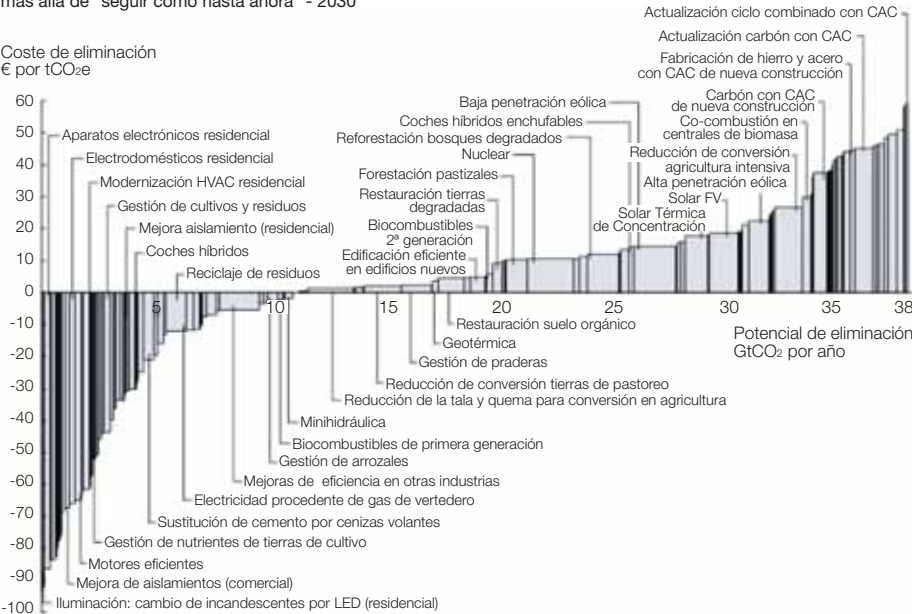
Procesando los resultados sectoriales presentados en (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009), los costes del negavatio asociados a la inversión realizada, son los que presentamos en la figura 617. Como podemos ver, los sectores transporte y edificación, a pesar de proporcionar buenas prestaciones económicas en términos del ciclo de vida (al incluir el efecto de los ahorros que producen), son los sectores con una mayor peso de la inversión sobre el ahorro alcanzado, motivo por el que resulta crítico el articular mecanismos de financiación adecua-

dos, y eliminar las barreras⁹⁶⁰ que introducen los mercados imperfectos, para conseguir el despliegue del gran potencial de eficiencia que llevan asociado.

En (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009) se resalta el hecho de que un 50% del potencial de reducción de emisiones está asociado al desarrollo de nuevas infraestructuras⁹⁶¹, mientras que solo un 15% está asociado a la rehabilitación (el 35% restante es independiente de las infraestructuras). Si a esto le añadimos el hecho de que las nuevas infraestructuras introducen una esclavitud por un periodo de 40-100 años, resulta fundamental evitar las inversiones en

Figura 615. Curva global de costes de reducción de emisiones de CO₂e (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009).

Curva de costes de medidas mundiales de mitigación de gases de efecto invernadero más allá de “seguir como hasta ahora” - 2030



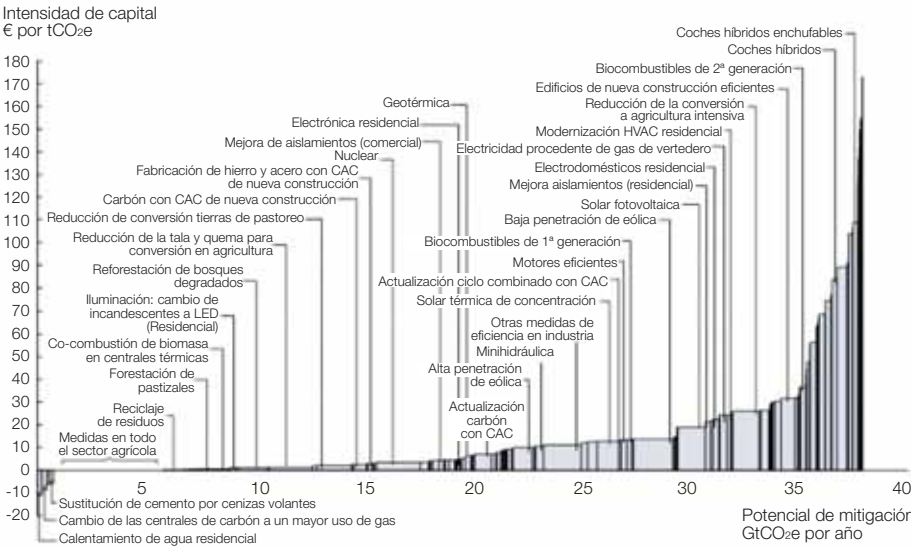
960 Barreras importantes en estos sectores son: elevado valor de la inversión inicial necesaria, baja repercusión económica del ahorro en el presupuesto total del usuario desagregado, y ausencia de repercusión de los efectos del ahorro sobre quien diseña y produce el equipo. Mecanismos adecuados para romper estas barreras son aquellos en los que se apoya el despliegue de inteligencia en el contexto E3.0: empresas de servicios energéticos vinculadas al desarrollo de los sistemas y equipos, empresas de movilidad vinculadas a los desarrolladores de vehículos, y agregadores de la demanda.

961 Este porcentaje claramente depende del sector considerado, y como veremos a continuación, para el caso del sector edificación, el potencial de la rehabilitación es muy superior.

Nota: la curva presenta una estimación del máximo potencial de todas las medidas técnicas para reducir los gases de efecto invernadero por debajo de 60€ por tCO₂ si cada una de ellas se persigue con fuerza. No es un pronóstico sobre el papel que jugarán las diferentes medidas y tecnologías. Fuente: Global GHG Abatement Cost Curve v2.0.

Figura 616. Curva global de intensidad de capital para la reducción de emisiones de CO2e (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009).

Intensidad de Capital por medidas de mitigación



Fuente: Global GHG Abatement Cost Curve v2.0.

infraestructuras intensas en carbono y sustituirlas por infraestructuras de baja intensidad en carbono⁹⁶², pues los errores cometidos ahora actuarán como barreras y retrasos⁹⁶³ para desarrollar el proceso de transición.

Por último, (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009) también apunta la gran dependencia de los resultados en términos de costes de eliminación de CO₂ con la evolución del precio de la energía en el contexto BAU. Pasar del precio del barril de 60 \$-2005/barril empleado en esta referencia (escenario AIE), a un coste de 120 \$-2005/barril, implica que el coste medio de todas las medidas de reducción de emisiones pasara de los 4 €-2005/tCO₂ a un coste negativo de -15 €-2005/tCO₂.

Otra referencia reciente en la que se presenta información asociada a los costes del ahorro es (Fiona MacKenzie, Christine Pout, Les Shorrock, Alison Matthews and John Henderson, “Energy efficiency in new and existing buildings. Comparative costs and CO₂ savings”, BRE Trust, 2010). Esta referencia se centra en el sector edificación, y enfoca su análisis a comparar los potenciales y costes asociados a desplegar medidas de eficiencia en el parque de edificios existentes, y a desplegar las exigencias de la nueva regulación⁹⁶⁴ en el Reino Unido sobre el parque de edificios nuevos. Concluye que la aplicación del nuevo código (CSH) conduce a costes de eliminación de CO₂ positivos⁹⁶⁵, y resulta mayor el potencial de reducción de emisiones asociado a la rehabilitación que el de la

962 En España tenemos un ejemplo cercano de lo que se debería evitar: las excesivas inversiones en ciclos combinados desde el año 2000, cuando era el momento de invertir en energías renovables, no solo absorbió parte de los recursos financieros que podrían haberse dedicado al cambio del modelo energético, sino que ahora introduce una elevada rigidez y presión sobre el sistema energético, debido a que la entrada de capacidad de generación renovable reduce las horas de operación de los ciclos combinados y no permite que sus inversores obtengan el retorno previsto sobre la inversión.

963 En esta referencia también se apunta que un retraso de 10 años (empezar en 2020 en lugar de en 2010) en el inicio del despliegue de las medidas de reducción de emisiones imposibilitaría que el despliegue de este potencial nos condujera a una senda de estabilización de 400 ppm CO_{2eq}, y resultaría incluso complicado alcanzar la senda que conduce a una estabilización en 550 ppm CO_{2eq}.

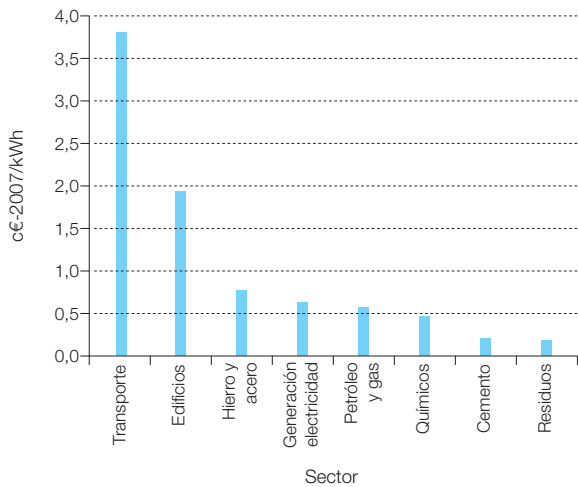
964 El CSH (code for sustainable homes) tiene 6 niveles de exigencia creciente. El nivel-5 es neutral para energía regulada, y el nivel-6 incluye la demanda no regulada en el alcance de neutralidad. El objetivo del gobierno del Reino Unido era que para 2016 todas las nuevas viviendas fueran nivel-6 (en este contexto, la neutralidad se refiere a equilibrar el consumo remanente de estos edificios con generación renovable).

965 Lo cual es en gran medida debido a los bajos costes de la energía que considera en el contexto BAU.

966 También concluye que construir con niveles 5 o 6 es más atractivo que los niveles 3 o 4 (menos exigentes) en términos de los costes de las emisiones y del potencial de reducción de emisiones: las medidas tintas no parecen una opción adecuada.

967 Reducción de un 80% de emisiones de 1990 en 2050.

Figura 617. Costes del negavatio (en términos de la inversión) asociados al promedio de las medidas analizadas para cada uno de los sectores indicados. Procesado a partir de (McKinsey&Company, “Pathways to a Low Carbon Economy”, 2009).



nueva construcción⁹⁶⁶, aunque para alcanzar el objetivo de reducción de emisiones del Reino Unido⁹⁶⁷ es imprescindible activar todas las medidas de reducción de emisiones, tanto en rehabilitación como en edificio nuevo, y todavía habrá que ir más allá des-carbonizando la red eléctrica.

El indicador empleado por esta referencia es una vez más el coste de reducción de emisiones, expresado en valor neto, y por tanto descontando los ahorros económicos asociados a la reducción de consumo de energía. A diferencia de otras referencias, en esta sí que se proporciona información sobre los coeficientes de emisiones y los costes de la energía a la que sustituyen los negavatos, por lo que es posible estimar los costes del negavatio a partir de los resultados presentados con un menor error. A modo de ejemplo, en la figura 618 recogemos la curva de costes de eliminación de CO₂ para la rehabilitación en el sector residencial. Como podemos ver, hay

una gran parte del potencial de reducción de emisiones que presenta costes en el ciclo de vida negativos. La cantidad de medidas con costes negativos sería incluso mayor en el caso de que se usaran unos costes de la energía más elevados⁹⁶⁸.

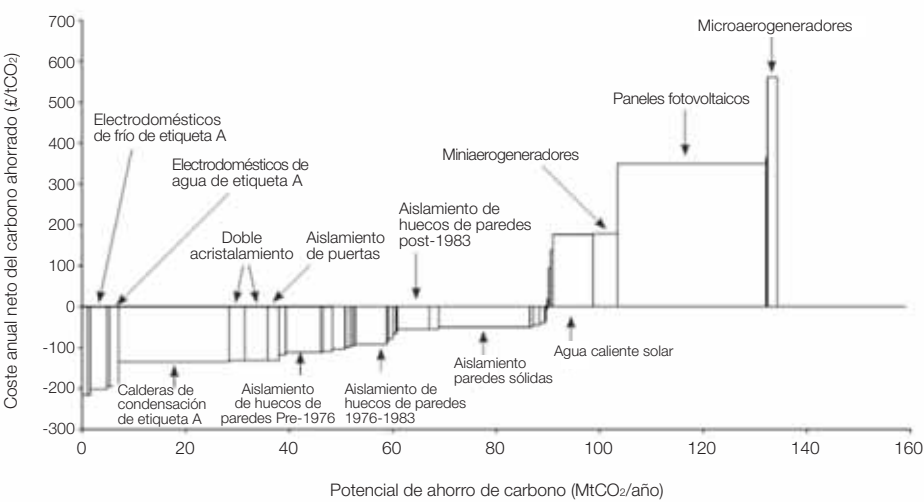
Procesado a partir de la información presentada en (Fiona MacKenzie, Christine Pout, Les Shorrock, Alison Matthews and John Henderson, “Energy efficiency in new and existing buildings. Comparative costs and CO₂ savings”, BRE Trust, 2010) una aproximación del coste del negavatio⁹⁶⁹, obtenemos la siguiente tabla para distintas medidas de eficiencia aplicables a la rehabilitación residencial. Evidentemente en estos resultados hay una cierta incertidumbre asociada al alcance de algunas de las medidas indicadas, así como a las tecnologías y métodos de implementación que se han supuesto, pero de cualquier forma proporciona un orden de magnitud del coste del ahorro asociado a distintas medidas de

⁹⁶⁸ Por ejemplo, para la electricidad esta referencia emplea un coste de 10,8 c€/2007/kWh, cuando el promedio del escenario BAU que nosotros hemos desarrollado conduce a un valor de 17,5 c€/2007/kWh. En el aporte de energía térmica, esta referencia considera costes incluso mucho más bajos: 3,1 c€/2007/kWh.

⁹⁶⁹ Expresado en términos del coste incremental respecto a la tecnología de referencia.

⁹⁷⁰ Se trata de una media aritmética, y no ponderada con el potencial de ahorro asociado a cada medida.

Figura 618. Curva de costes de reducción de emisiones para la rehabilitación de edificios residenciales proporcionada en (Fiona MacKenzie, Christine Pout, Les Shorrocks, Alison Matthews and John Henderson, “Energy efficiency in new and existing buildings. Comparative costs and CO2 savings”, BRE Trust, 2010).



eficiencia. Podemos observar cómo los costes indicados van desde valores negativos, hasta valores que en el rango de la eficiencia pueden situarse en torno a 5 c€/2007/kWh. El valor medio⁹⁷⁰ del coste del ahorro asociado al conjunto de las medidas apuntadas en esta tabla es de 1,16 c€/2007/kWh. También resulta interesante observar la gran diferencia de costes entre las medidas enfocadas a la eficiencia, y las correspondientes a la generación renovable, si bien es cierto que a bien seguro estos resultados no contemplan la evolución por las curvas de aprendizaje de las tecnologías consideradas (fotovoltaica y micro eólica), y se han limitado a introducir los costes actuales en el Reino Unido. De este análisis podemos concluir que, por lo general, el coste del negavatio, tanto el obtenido por nosotros, como el que se puede deducir del análisis de la bibliografía, queda bien por debajo del coste máximo⁹⁷¹ del ahorro

para que el coste total del sistema energético en el contexto E3.0 sea inferior al coste total del sistema energético en el contexto BAU.

⁹⁷¹ Evaluado más adelante en este informe.

Tabla 2. Estimación del coste del ahorro asociado a distintas medidas de eficiencia aplicadas a la rehabilitación energética en el sector residencial del Reino Unido.

Medida de eficiencia	Coste ahorro c€-2007/kWh
Reducción consumo stand-by	-1,84
TV con TDT integrada	-1,84
Equipos de frío clase-A++	-1,04
Hornos clase-A	-0,61
Calderas condensación clase-A	-0,03
Ventanas: simple → doble	0,02
Puertas aisladas	0,03
Aislamiento desván: 0 → 270 mm	0,36
Aislamiento cavidades pared pre-1976	0,51
Aislamiento suelo	0,57
Aislamiento desván: 25 → 270 mm	0,72
Aislamiento tuberías primario	0,85
Aislamiento cavidades pared (1976 - 1983)	0,92
Ventanas: simple → doble futuro	0,96
Aislamiento desván 50 → 270 mm	1,13
Termostatos calefacción por habitación	1,30
Aislamiento desván 75 → 270 mm	1,57
Aislamiento cavidades pared post-1983	1,72
Aislamiento paredes macizas	1,96
Aislamiento desván 100 → 270 mm	1,97
Válvulas termostáticas radiadores	2,06
Mejora estanqueidad aire	2,20
Aislamiento desván: 125 → 270 mm	2,30
Aislamiento desván: 150 → 270 mm	2,97
Ventanas: nueva doble → futuro doble	3,57
Placas cocina inducción	4,29
Iluminación eficiente	4,76
Fotovoltaica	31,32
Micro eólica	43,71

Grupo de aerogeneradores
y torres de luz en el parque
eólico de La Veleta,
en Monasterio de
Rodilla (Burgos).

© PEDRO ARMESTRE





imagen

Fachada del Hotel Melià
Castilla (Madrid).
© JOSÉ LUIS ROCA

Cobertura de la demanda

5

5.1 Introducción

En este capítulo vamos a presentar los resultados del análisis de la cobertura de la demanda de los contextos BAU y E3.0. El objetivo final es evaluar el desempeño de cada uno de los casos analizados mediante el coste total asociado a la cobertura de la demanda energética, tanto en términos de coste anual absoluto, como en términos de coste relativo a la unidad de energía final suministrada.

Si partimos de la estructura de la demanda de energía final, y tenemos en cuenta las características de cada una de las tecnologías consideradas, procederemos a dimensionar distintos mix de generación con capacidad de dar cobertura a la demanda. Una vez conocida la estructura del mix de generación, y la participación de cada una de las tecnologías consideradas en él, partiendo de los escenarios de costes desarrollados en el capítulo anterior, ya estaremos en disposición de evaluar el coste total asociado a la cobertura de la demanda.

Por tanto, además de presentar la estructura de la generación y de la demanda en los términos relevantes para acometer el análisis de la cobertura de la demanda, en este capítulo presentaremos los resultados correspondientes a los análisis de cobertura de la demanda (en base horaria), y a los costes resultantes de cada una de las opciones consideradas.

5.2 Estructura de la generación renovable

Las series horarias de capacidad de generación renovable, para las distintas tecnologías consideradas, que se han empleado en este estudio, son las que se desarrollaron para el estudio R100% (GP, 2007). En esta referencia, si partimos de una caracterización tecnológica

conservadora correspondiente a la mejor tecnología disponible en la fecha de elaboración del trabajo, se desarrollaron simulaciones horarias a nivel provincial para cada una de las tecnologías renovables consideradas. Esta información, junto a la evaluación del potencial de las distintas tecnologías y su distribución geográfica desarrollada en el estudio *Renovables 2050* (GP, 2005), nos proporcionan la distribución geográfica de la capacidad de generación horaria de cada una de las tecnologías renovables consideradas.

Para cada uno de los mix de generación considerados se han empleado estas modulaciones temporales a nivel horario, de la capacidad de generación de cada una de las tecnologías, ponderándolas con la potencia instalada en el mix en cuestión, para generar la serie horaria correspondiente a la disponibilidad de generación renovable. Esta serie horaria de capacidad de generación, junto a la serie horaria de demanda y a los mecanismos de regulación disponibles en el mix considerado, se han incorporado en un modelo⁹⁷² de cobertura de la demanda que proporciona como salida las condiciones horarias de operación del mix de generación considerado y de sus elementos de regulación, lo cual a su vez condiciona los costes de la energía generada.

5.3 Estructura demanda energética

En los capítulos anteriores dedicados al desarrollo de los escenarios de demanda BAU y E3.0 ya se proporcionó información detallada sobre la estructura de la demanda energética.

En este capítulo vamos a recuperar algunos de estos resultados, procesándolos y representándolos de la forma más conveniente para acometer el estudio de la cobertura de la demanda.

⁹⁷² El modelado de cobertura de la demanda se ha desarrollado principalmente con TRNSYS.

De igual forma, en este capítulo complementaremos la información ya presentada sobre la estructura de la demanda, con información relativa a su distribución temporal, pues el análisis de cobertura de la demanda se va a desarrollar en base horaria a lo largo del año.

5.3 1 Demanda BAU

Las figuras 619 y 620 nos presentan la estructura de demanda de energía final total en el contexto BAU para los años 2007 y 2050, diferenciando entre electricidad, biocombustibles, biomasa directa, energía solar térmica y el resto de combustibles. Como podemos apreciar, el escenario BAU para 2050 incorpora un significativo incremento de la electrificación del sistema energético, pero sigue estando fuertemente dominado por la demanda de combustibles, que en la aproximación BAU a la cobertura de la demanda están constituidos por combustibles fósiles.

Uno de los casos de cobertura de la demanda que vamos a analizar, es el del BAU con generación 100% renovable. Para este caso, la demanda de combustibles más allá de la aportación de la biomasa, se cubrirá con hidrógeno generado a partir de electricidad de origen renovable. El elevado peso de los combustibles (y por tanto del hidrógeno en este caso con generación 100% renovable) en la estructura de demanda total, traerá importantes consecuencias tanto sobre la operación y requerimientos de regulación para la cobertura de la demanda, como sobre los costes.

Pero más allá de la demanda de energía final, desde el punto de vista de cómo cubrirla es relevante la caracterización de la demanda de recursos energéticos. La figura 621 nos recoge la estructura de la demanda de recursos necesaria para la cobertura de la demanda BAU en el año 2050.

Para el caso de cobertura de la demanda BAU con generación 100% renovable, como

Figura 619. Estructura de demanda de energía final en el BAU 2007.

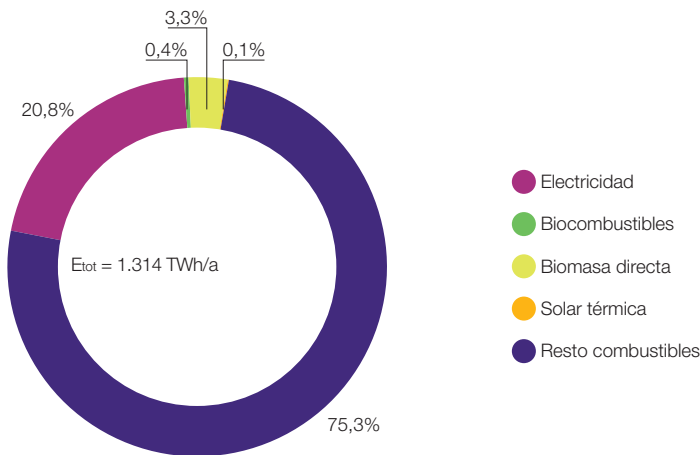


Figura 620. Estructura de la demanda de energía final en el BAU 2050.

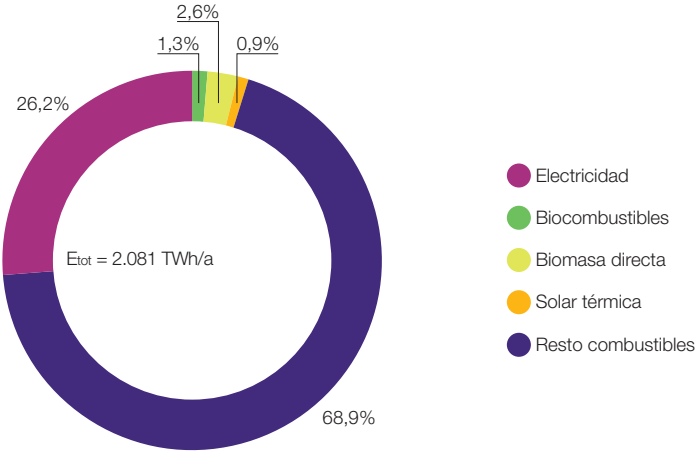
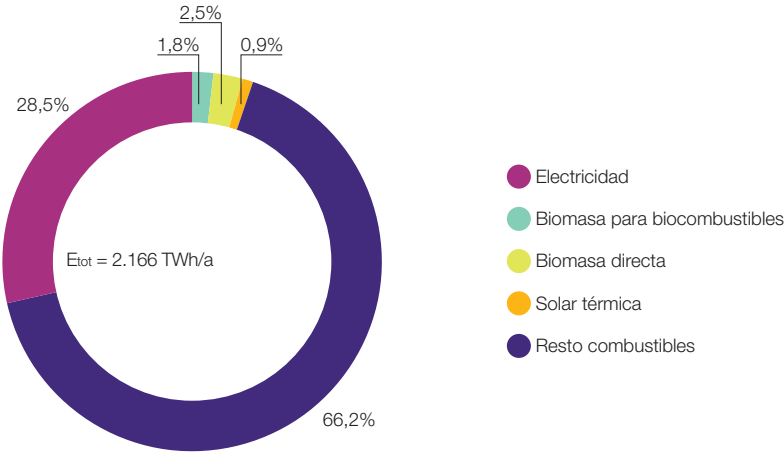


Figura 621. Estructura de la demanda de recursos BAU en 2050.



comentábamos anteriormente, la estrategia adoptada es la cobertura de la parte de demanda de energía final en forma de combustibles distintos a la biomasa (lo que para un mix BAU se cubriría con combustibles fósiles) con hidrógeno producido a partir de electricidad de origen renovable. La figura 622 nos recoge los requerimientos de generación para

este caso, donde destaca el elevado peso del requerimiento de generación eléctrica, un 83% de la cual se empleará para producir hidrógeno tal y como nos muestra la figura 623.

Figura 622. Estructura de los requerimientos de producción energética en el BAU 2050. Nótese que un 83% del requerimiento de generación eléctrica es para la producción de hidrógeno (1434 TWh/a de hidrógeno).

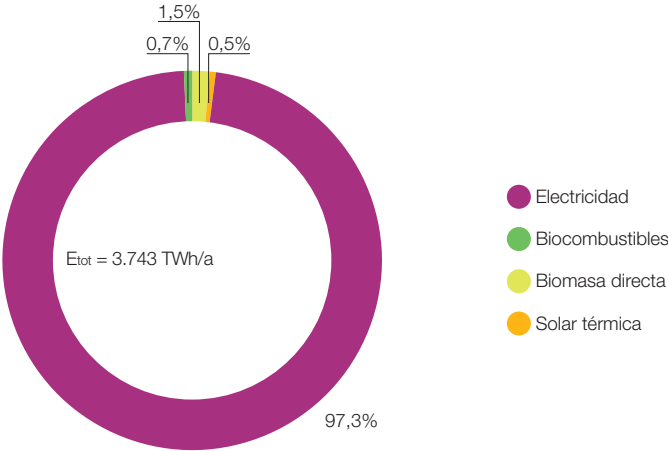
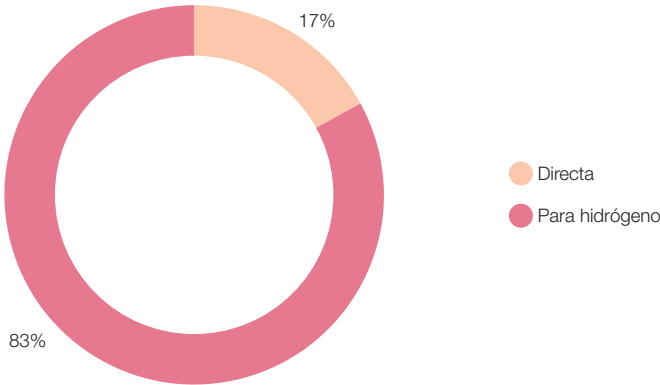


Figura 623. Requerimientos de generación eléctrica BAU en 2050 para el caso de 100% renovable.



5.3.2 Demanda E3.0

Por lo que respecta a la demanda en el contexto E3.0, la figura 624 recoge la estructura de la demanda de energía final en el año 2050 para la estrategia adoptada⁹⁷³. Como podemos ver, en el contexto E3.0 la electrificación del sistema energético es mucho más elevada, y la participación del hidrógeno más limitada que para el caso de

la demanda BAU cubierta con generación 100% renovable: este aspecto tendrá importantes repercusiones tanto sobre el desempeño de los mix de generación, como sobre sus requerimientos de regulación y sus costes. También podemos apreciar en esta figura la gran reducción en la demanda de energía final gracias al despliegue de eficiencia e inteligencia por el sistema energético.

Figura 624. Estructura demanda energía final en E3.0 para 2050.

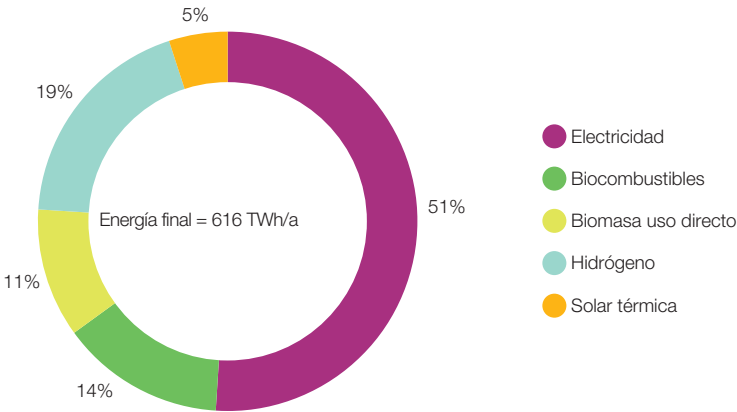
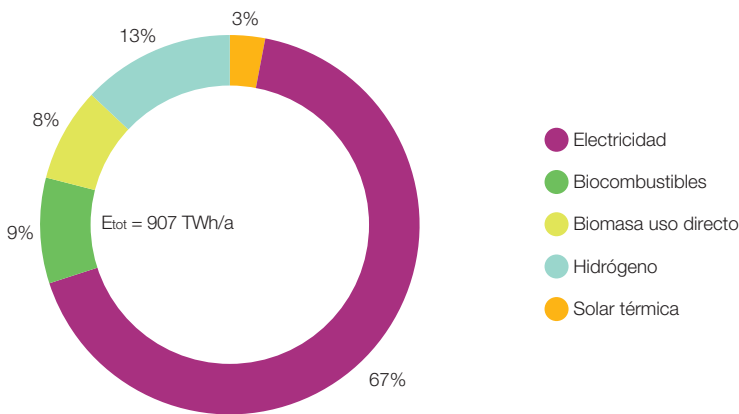
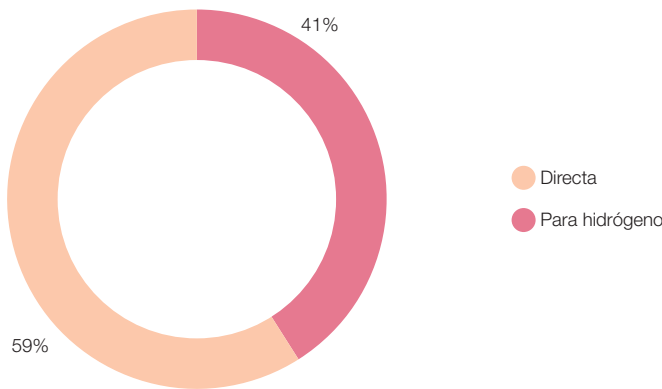


Figura 625. Estructura requerimientos de producción energética para E3.0 en 2050. Nótese que un 41% del requerimiento de generación eléctrica es para producción de hidrógeno.



973 Hay múltiples opciones para plantear la cobertura de la demanda con energías renovables. Como ejemplo, en este informe hemos adoptado para el contexto E3.0 una estrategia con un uso significativo de biomasa para la cobertura de la demanda industrial y de los usos no energéticos, y dividir posteriormente el requerimiento de combustibles adicionales entre el hidrógeno y la biomasa imponiendo un criterio de igualdad de ocupación de superficie del territorio. Por el contrario, tal y como ilustramos anteriormente, en el contexto BAU con cobertura 100% renovable hemos empleado una estrategia con un mayor peso del hidrógeno dado el mayor volumen de demanda. Adicionalmente a estos dos casos analizados, existen infinitas combinaciones tanto para la configuración del mix de generación eléctrica como para el reparto de la cobertura de demanda de combustibles entre biomasa e hidrógeno que permiten cubrir la demanda de energía con 100% renovables tanto en el contexto BAU como en el E3.0. La elección final de la configuración de los mix energéticos permite por tanto acomodar consideraciones adicionales como son los aspectos de costes, de utilización del territorio, de incentivación estratégica de ciertas tecnologías, o de acomodamiento a la evolución técnico-económica de las distintas opciones.

Figura 626. Requerimientos de generación eléctrica E3.0 en 2050. Total generación eléctrica = 604 TWh/a.



Por lo que respecta a los requerimientos de producción energética para el contexto E3.0, la figura 625 nos muestra la estructura de la producción energética requerida, donde vemos el gran dominio de la electricidad, de la cual un 41% se dedica a la producción del hidrógeno tal y como nos muestra la figura 626.

Como indicábamos anteriormente, el distinto peso relativo del requerimiento de hidrógeno

en los contextos BAU y E3.0 al plantear la cobertura de la demanda con energías renovables, tiene importantes repercusiones sobre el desempeño y requerimientos de regulación del mix de generación, así como sobre sus costes. La figura 627 nos ofrece una comparación entre la estructura de la demanda de electricidad para los contextos BAU y E3.0, cuando en el BAU se plantea la cobertura de la demanda con 100% de generación

Figura 627. Demandas de electricidad directa y electricidad para hidrógeno en los contextos BAU y E3.0 para el año 2050.

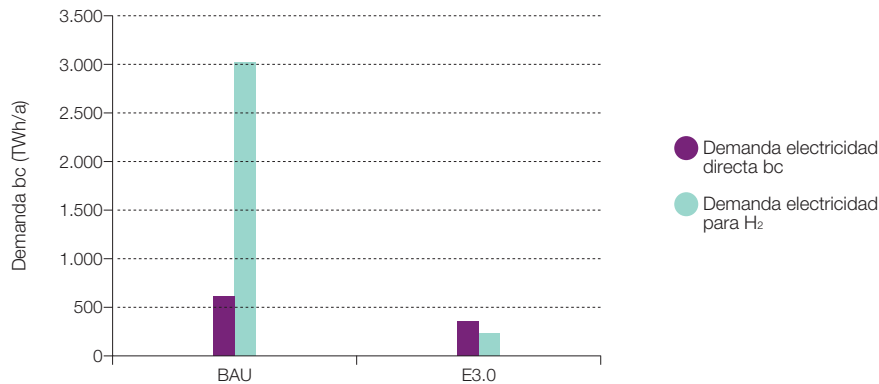


Figura 628. Potencias pico de electricidad directa y electricidad para hidrógeno en los contextos BAU y E3.0 en el año 2050.

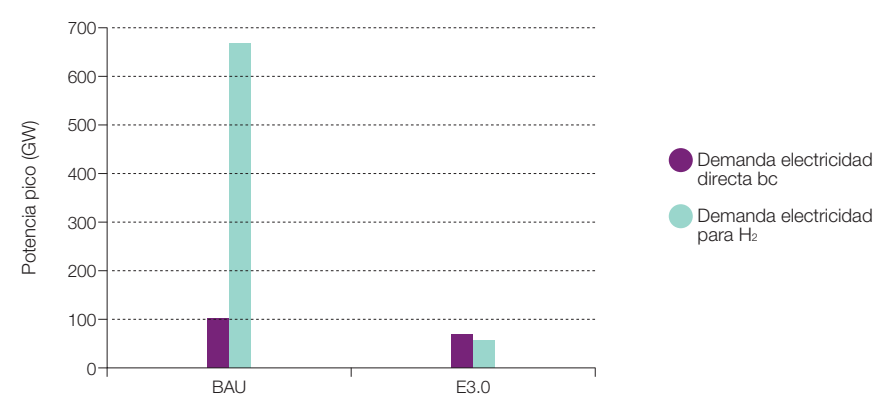
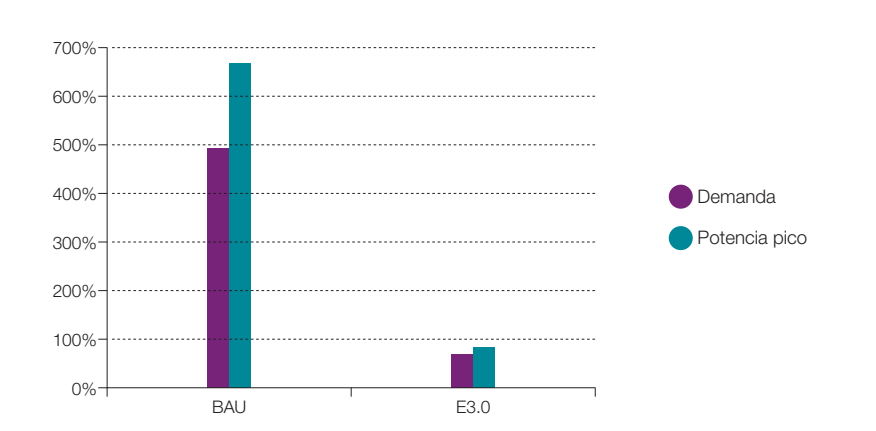


Figura 629. Ratios de electricidad para H₂ a electricidad directa para la demanda y potencia pico en el año 2050 para los contextos BAU y E3.0.



renovable. Como podemos observar, en el BAU existe un gran desequilibrio entre los requerimientos de electricidad para generar hidrógeno y los necesarios para la cobertura de la demanda de electricidad directa. Para interpretar estos resultados es preciso tener presente que para el contexto E3.0 la demanda de electricidad directa incluye la demanda de electricidad para los vehículos

eléctricos, que dominan el sector transporte en el caso del contexto E3.0.

Es más, si anticipamos algún resultado de las distribuciones horarias de la demanda, en la figura 628 podemos comparar los requerimientos de potencia pico para la cobertura de la demanda de electricidad directa y electricidad para hidrógeno en los contextos BAU y

E3.0. Como podemos apreciar la descompensación del BAU en términos de potencia es todavía mayor que la correspondiente a la demanda.

En la figura 629 recopilamos los ratios entre electricidad directa y electricidad para producción de hidrógeno, tanto en términos de potencia como de demanda, y para los contextos E3.0 y BAU. La cobertura de la demanda del contexto BAU con renovables va a estar fuertemente dominada por este gran desequilibrio en términos de generación para producir hidrógeno.

5.4 Demanda cronológica

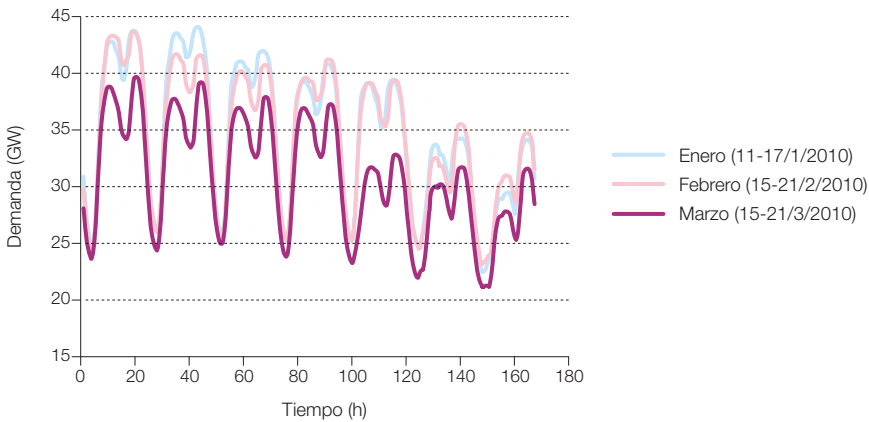
Hasta este punto la información que hemos presentado relativa a la estructura de la demanda de energía en los contextos BAU y E3.0 se limita a los valores totales anuales de la demanda de energía. Sin embargo, para acometer el análisis de la cobertura de la demanda con sistemas basados en energías renovables

es preciso disponer de información relativa a la distribución temporal de la demanda de energía final. Puesto que los análisis de cobertura de la demanda que hemos desarrollado analizan la cobertura de la demanda a nivel horario durante un año entero, es preciso disponer de información relativa a la distribución horaria de la demanda a lo largo de un año.

5.4.1 Demanda BAU

Por lo que respecta a la demanda BAU, en el caso de la cobertura de la demanda con un mix BAU, tan solo requerimos disponer de la caracterización de la distribución temporal de la demanda eléctrica, pues la capacidad de acumulación asociada a la distribución de combustibles fósiles ya proporciona los elementos de regulación necesarios para garantizar la cobertura de la demanda del resto de elementos de consumo de energía final. Y puesto que nos encontramos en un contexto BAU, asumiremos como representativa la modulación horaria de la demanda de electricidad

Figura 630. Evolución horaria de la demanda eléctrica durante una semana tipo de cada uno de los meses del primer trimestre del año 2010. Datos ENTSO-E.



actual del sistema eléctrico a lo largo de todo el periodo de tiempo considerado.

Las figuras 630 a 633 reproducen la dependencia horaria de la demanda de electricidad en el año 2010 durante una semana tipo de cada uno de los meses del año. Como pode-

mos observar, la estructura temporal de la demanda de electricidad se caracteriza por la presencia de dos picos diarios de demanda bastante equilibrados⁹⁷⁴, y un valle de demanda por las noches.

Figura 631. Evolución horaria de la demanda eléctrica durante una semana tipo de cada uno de los meses del segundo trimestre del año 2010. Datos ENTSO-E.

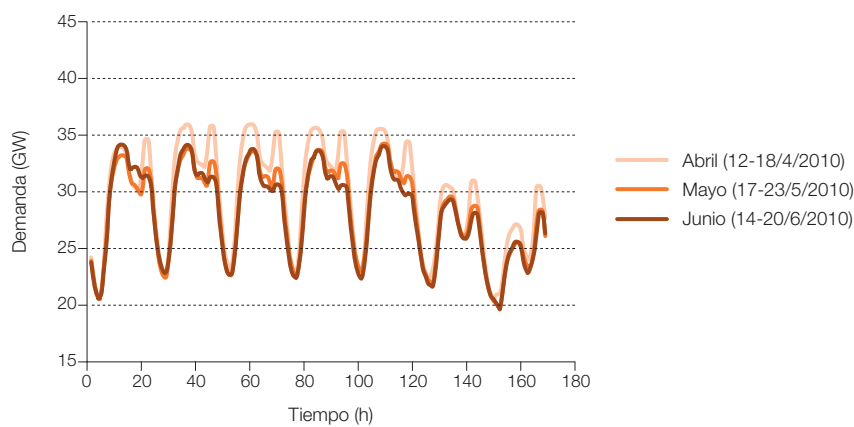
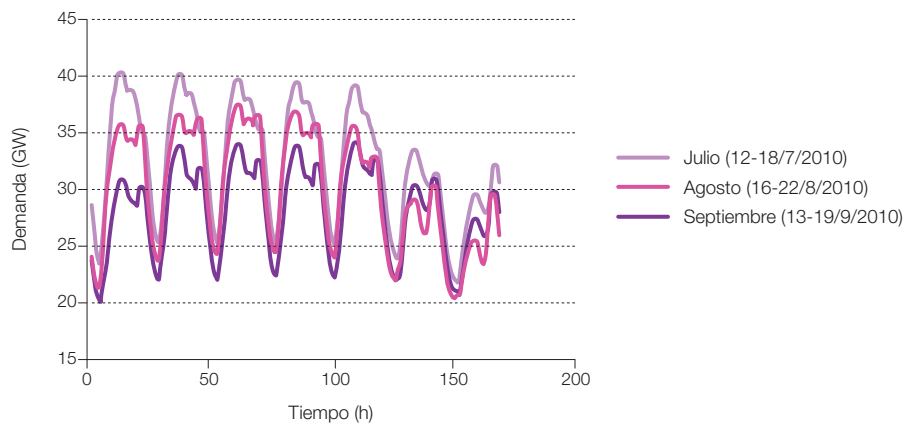


Figura 632. Evolución horaria de la demanda eléctrica durante una semana tipo de cada uno de los meses del tercer trimestre del año 2010. Datos ENTSO-E.



⁹⁷⁴ Si bien en los meses de invierno el segundo pico domina al primero, mientras que en verano se invierte la situación.

Figura 633. Evolución horaria de la demanda eléctrica durante una semana tipo de cada uno de los meses del cuarto trimestre del año 2010. Datos ENTSO-E.

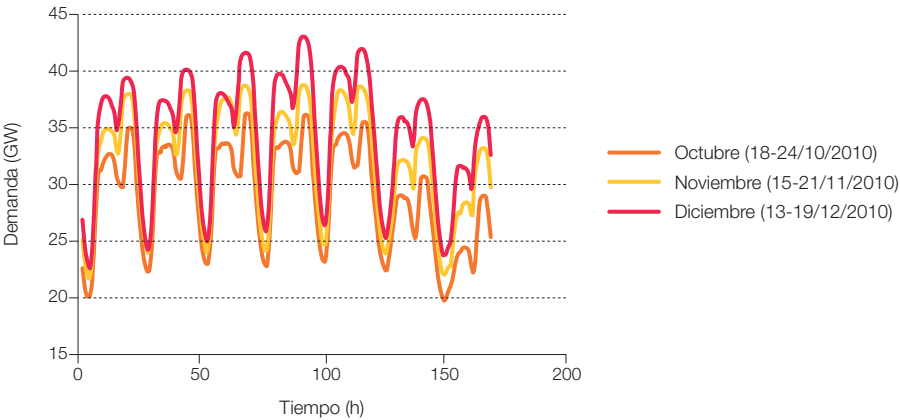
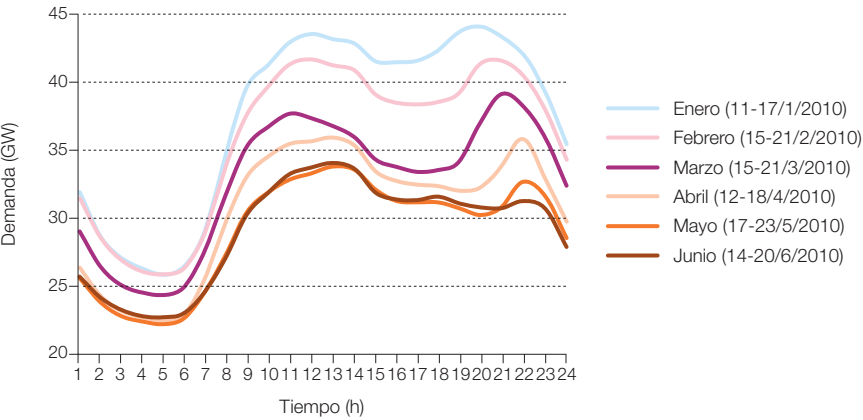
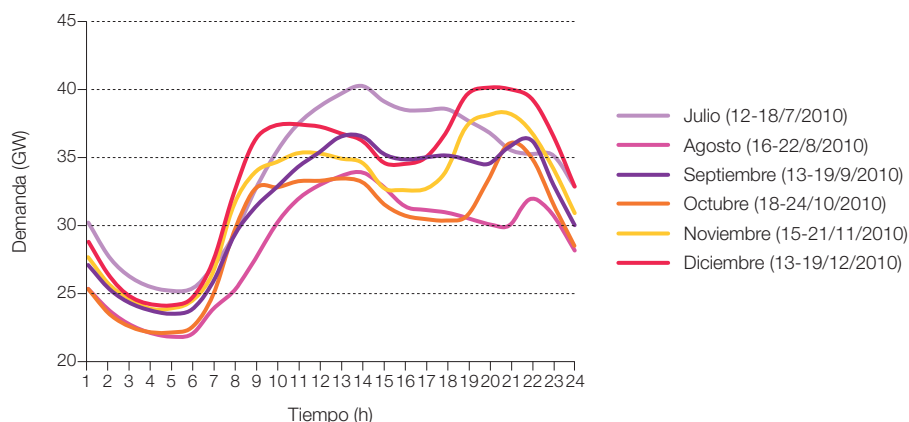


Figura 634. Evolución horaria de la demanda eléctrica durante el martes de una semana tipo para cada uno de los meses del primer semestre del año 2010. Datos ENTSO-E.



Las figuras 634 y 635 reproducen la dependencia horaria de la demanda de electricidad durante un día (concretamente el martes) de cada una de las semanas anteriormente presentadas, para poder apreciar mejor la estructura de la demanda en uno o dos picos diarios y un valle nocturno con una importante reducción de la demanda.

Figura 635. Evolución horaria de la demanda eléctrica durante el martes de una semana tipo para cada uno de los meses del segundo semestre del año 2010. Datos ENTSO-E.



Esta estructura de las curvas de demanda actual resulta problemática para el sistema de generación BAU, pues la gran descompensación entre valle y puntas resulta poco conveniente desde varios puntos de vista, como la reducción del factor de capacidad con el que pueden operar algunas centrales⁹⁷⁵, o la necesidad de recurrir a centrales poco eficientes⁹⁷⁶ para cubrir las puntas de consumo.

Además, en el mix BAU del sistema eléctrico existen una serie de centrales (entre las que se encuentran las nucleares), denominadas de carga base, que funcionan con factores de capacidad muy elevados (muchas horas al año), ajustando su nivel de generación a la potencia determinada por los valles de la demanda. Esta generación de carga base en el mix BAU se caracteriza por ser muy poco flexible, lo cual no resultaba problemático en el contexto BAU del pasado, pues su función era operar en condiciones prácticamente constantes a lo largo de todo el año, pero ya en el presente está conduciendo a problemas con el grado de penetración de las tecnologías renovables no gestionables. En efecto,

durante las noches (periodo de carga base) con una gran disponibilidad de recurso eólico, la potencia eólica instalada en España ya conduce de vez en cuando a la situación en que la suma de la potencia aportada por las centrales inflexibles de carga base y la generación eólica excede el valle de demanda, motivo por el cual es preciso regular con los parques eólicos (las centrales rígidas de carga base no pueden hacerlo) para disipar capacidad de generación, lo cual además de ser un sinsentido desde el punto de vista de la eficiencia⁹⁷⁷ y la sostenibilidad⁹⁷⁸, genera problemas económicos para las centrales renovables⁹⁷⁹.

Otra situación problemática de la curva de demanda actual con el mix de generación existente está asociada a la sobre instalación de potencia de las centrales de ciclos combinados durante los últimos años. Estas centrales son más flexibles que las de operación en carga base, y por tanto, ante la creciente aportación de las energías renovables se ven obligadas a reducir su factor de capacidad, de tal forma que se enfrentan con problemas para recuperar las inversiones realizadas. Esta

⁹⁷⁵ En efecto, la gran diferencia entre valle y punta obliga a instalar en el sistema una potencia muy superior a la que correspondería a la demanda media, y por tanto, algunas de estas centrales no podrán funcionar un número elevado de horas al año, y reducirán sus ingresos anuales por venta de electricidad, en algunos casos, comprometiendo su viabilidad económica.

⁹⁷⁶ Dado que esas centrales van a trabajar muy pocas horas al año, no queda justificada una elevada inversión en las mismas, pues con sus escasos ingresos por venta de electricidad y servicios complementarios, no podría recuperarse esa inversión.

⁹⁷⁷ Pues se disipa una energía con unos costes de operación mucho menores que los correspondientes a las centrales de carga base que se mantienen en funcionamiento como consecuencia de su inflexibilidad.

⁹⁷⁸ Se disipa energía de origen renovable para dejar entrar energía de origen nuclear cuyo uso generará más residuos, o de centrales de carbón que emiten grandes cantidades de CO₂.

⁹⁷⁹ Pues en estas primeras etapas de su implementación en el sistema energético, requieren integrar en el sistema toda su generación para poder recuperar las inversiones realizadas.

situación, que en esencia se corresponde a una decisión equivocada⁹⁸⁰ de una serie de inversores y que por tanto debería repercutir tan solo a estos inversores, en el caso del sistema eléctrico español, con una injerencia muy acusada de la regulación sobre la operación del mercado, acaba afectando a todos los consumidores y al conjunto del desarrollo del sistema eléctrico⁹⁸¹. El allanamiento de la curva de demanda, no mediante la introducción de eficiencia o gestión de la demanda para bajar los picos, sino mediante el incremento de demanda nocturna en los periodos valle, permitiría (siempre que se mantenga acotado y ralentizado el desarrollo de las energías renovables) incrementar los factores de capacidad con los que operan las centrales de ciclo combinado, aumentar los ingresos y por tanto mejorar el balance económico de esos inversores que apostaron por la tecnología equivocada en el momento equivocado, todo ello a costa de un incremento de emisiones de CO₂.

Y es precisamente por este motivo que en la actualidad hay una concordancia entre todos los actores del sector eléctrico en la conveniencia de introducir vehículos eléctricos, orientados a una recarga nocturna que “rellene” el valle de la curva de demanda, y permita atender este incremento de demanda eléctrica con el parque generador ya instalado. En el caso de un contexto E3.0, la recarga óptima de los vehículos eléctricos no estaría ligada a la regularización del valle nocturno de la curva de demanda actual, sino que obedecería a una interacción mucho más dinámica y bidireccional en la que los vehículos eléctricos responderían a las necesidades del sistema eléctrico en cada instante. Y esta observación es extensible a cualquier otra actividad de gestión de la demanda: los requerimientos de respuesta de la demanda en el contexto E3.0 no coinciden

con los del contexto BAU, y por lo general son mucho más diversos que ellos.

Por estos motivos, cuando en el contexto E3.0 (que es el que tiene un gran parque de vehículos eléctricos) planteemos el caso de cobertura de la demanda con recarga BAU de los vehículos eléctricos, nos referiremos a una recarga de los vehículos eléctricos en el valle nocturno de la curva de carga actual del sistema eléctrico.

Como hemos indicado más arriba, para el contexto BAU supondremos una modulación temporal de la demanda eléctrica horaria como la actualmente existente. Esta fue la misma aproximación empleada en el informe R100% (GP, 2006), para cuyo caso se empleó la curva de demanda del año 2003 (figura 636), que era el año de referencia de ese informe, para adaptarla al nivel de demanda eléctrica del escenario desarrollado en esa referencia, y obtener la evolución temporal de la demanda de la figura 637, que fue la empleada para desarrollar los análisis de cobertura de la demanda con sistemas basados en energías renovables.

⁹⁸⁰ El error asociado a esta decisión de inversión era evidente desde un principio, pues cuando empezaron a despegar los ciclos combinados en España, con un retraso de varias décadas respecto a la introducción de esta tecnología en otros países, el paradigma del sistema energético ya había cambiado y la inversión apropiada era la correspondiente a la capacidad de generación con energías renovables, de entre las cuales, las centrales termosolares hibridadas ya entonces destacaban como una alternativa adaptada al nuevo paradigma y con capacidad de ofrecer los mismos servicios que una central de ciclo combinado. Ver por ejemplo: García-Casals X., “La energía solar térmica de alta temperatura como alternativa a las centrales térmicas convencionales y nucleares”, Greenpeace España, Noviembre 2001.

⁹⁸¹ En efecto, el desenlace de este episodio de los ciclos combinados se ha saldado en unos sobrecostes asociados a pagos por capacidad a las centrales de ciclos combinados (repercutidos por tanto sobre el conjunto de los consumidores), y en una cruzada contra las energías renovables que ha desembocado en una inestabilidad regulatoria sin precedentes, que a su vez ha obstaculizado de forma muy importante el desarrollo de estas tecnologías, alejándolas de la trayectoria de transición hacia el contexto E3.0.

Figura 636. Evolución horaria de la demanda de electricidad durante el año 2003. Datos REE.

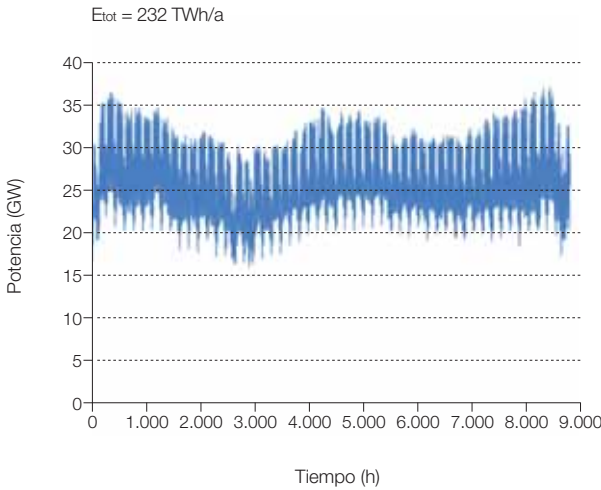
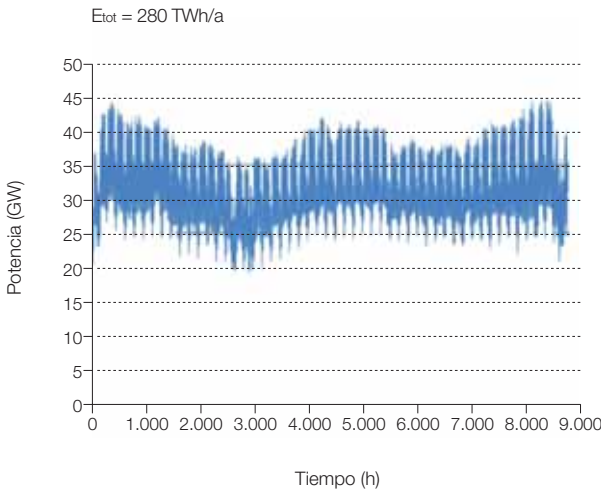


Figura 637. Evolución horaria de la demanda de electricidad empleada en el estudio R100% (GP, 2005).



Para el desarrollo de este estudio, hemos actualizado la modulación temporal de la demanda para acercarnos a las condiciones actuales del sistema eléctrico. Sin embargo, el periodo de crisis económica que atravesamos desde el año 2009 ha podido introducir modificaciones puntuales

no representativas del contexto BAU sobre la distribución de la demanda eléctrica. En efecto, por lo que respecta a la demanda total de energía eléctrica, tal y como muestra la figura 638, el año 2008 es el último de los años recientes que parece seguir la tendencia BAU.

Figura 638. Evolución anual de la demanda eléctrica en barras de central. Datos REE.

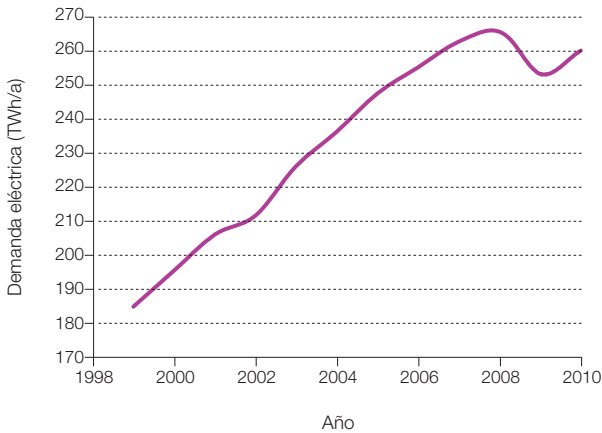
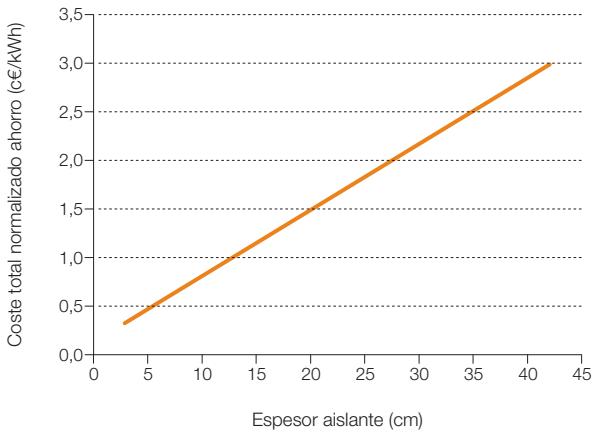


Figura 639. Evolución horaria de la demanda de electricidad durante el año 2008. Datos REE.



Por este motivo, hemos elegido la modulación temporal de la demanda eléctrica en el año 2008 para describir la dependencia temporal de la demanda de electricidad en el contexto BAU. La figura 639 reproduce la evolución horaria de la demanda eléctrica en el año 2008, mientras que la figura 640 proporciona la adaptación al escenario BAU 2050 desarrollado en este estudio.

Como se puede apreciar al comparar estas figuras con las correspondientes a la modulación horaria de la demanda en el año 2003 implementada en el estudio R100% (GP, 2007), se puede comprobar que hay una diferencia significativa⁹⁸² en la modulación estacional de la demanda. Para facilitar esta comparación, en la figura 641 presentamos la comparativa directa entre polinomios de

982 El hecho de que tanto en el estudio R100% (GP,2007) como en el actual, con modulaciones temporales distintas de la demanda eléctrica, hayamos constatado la facilidad para proporcionar una cobertura de la misma con sistemas basados en energías renovables, constituye una muestra más de la capacidad de estos sistemas de generación para dar cobertura a la demanda.

ajuste de 6º grado de las series horarias de demanda adimensionalizada con la demanda anual máxima para los años 2003 y 2008, mientras que las figuras 642 y 643 presentan

la comparativa de la evolución horaria de la demanda adimensionalizada con la demanda anual máxima en las semanas 1 (enero) y 30 (julio) para estos dos años.

Figura 640. Evolución horaria de la demanda de electricidad en el contexto BAU para el año 2050.

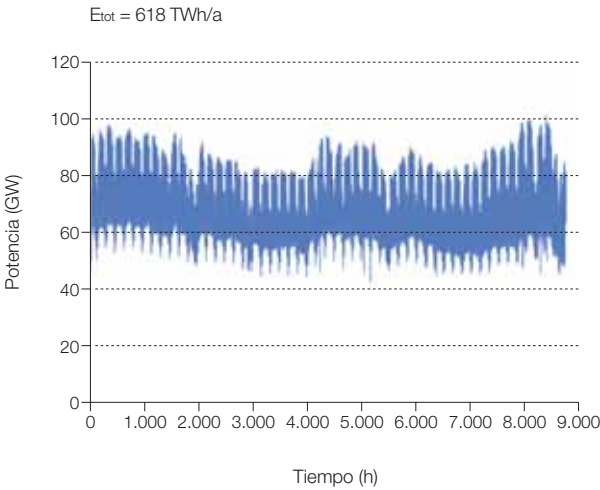


Figura 641. Comparativa de los polinomios de ajuste de 6º grado que ajustan las series anuales de demanda horaria de electricidad adimensionalizadas con la demanda anual máxima.

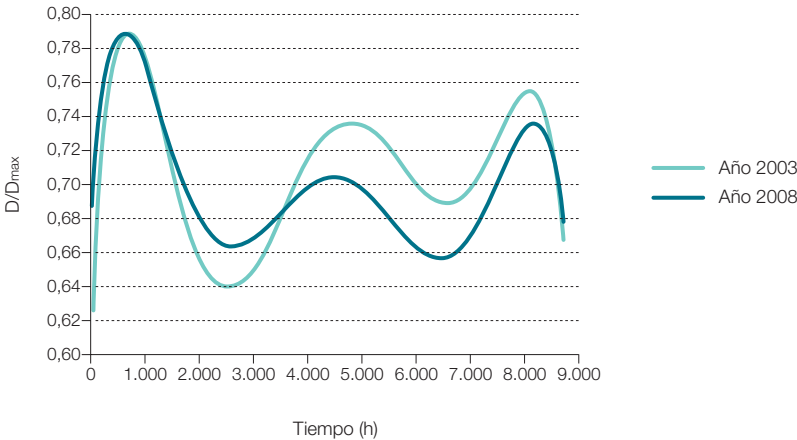


Figura 642. Comparación de la demanda horaria adimensionalizada con la demanda anual máxima para la semana-1 (enero) en los años 2003 y 2008.

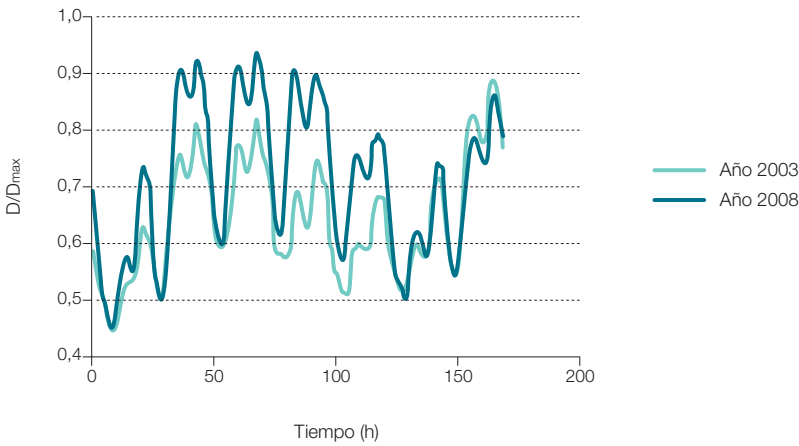
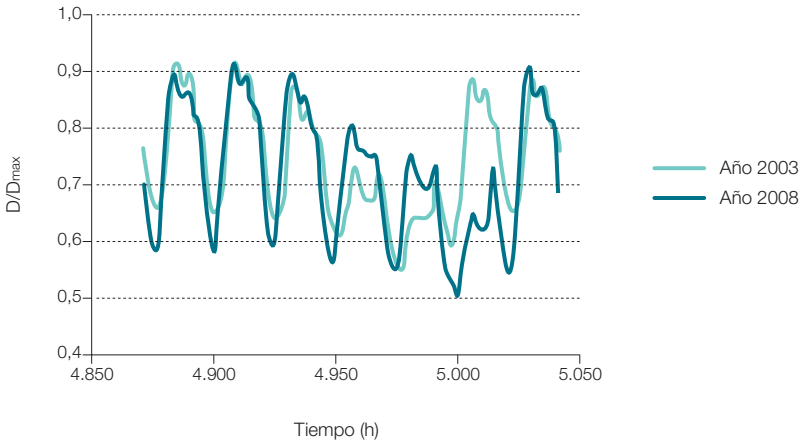


Figura 643. Comparación de la demanda horaria adimensionalizada con la demanda anual máxima para la semana-30 (julio) en los años 2003 y 2008.



Si comparamos los escenarios de demanda eléctrica BAU para el año 2050 en este estudio y en el informe R2050 (GP, 2005), observamos que existe una gran diferencia entre ambos. Mientras en (GP, 2005) empleábamos una demanda de 280 TWh/a, ahora

tenemos una demanda de 618 TWh/a. La explicación de esta diferencia obedece a distintos elementos:

- El escenario desarrollado en (GP, 2005) era un escenario macroscópico basado en la

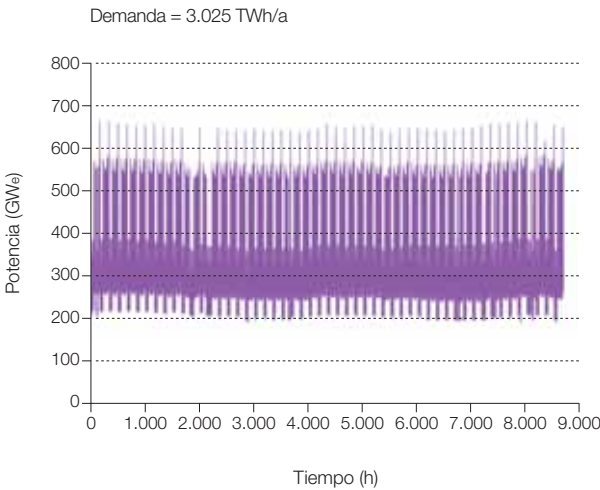
extrapolación tendencial del consumo per cápita histórico de electricidad, y en la adopción de un escenario de población que presentaba un máximo en torno al año 2025 y conducía en 2050 a una población peninsular del orden de 38 millones de personas. Para el desarrollo de este estudio hemos adoptado un escenario poblacional que en 2050 conduce a una población del orden de 48 millones de personas. Ambos escenarios poblacionales se corresponden con escenarios del INE en la fecha de realización de cada uno de los informes. Sin embargo, la gran diferencia de población tiene importantes repercusiones sobre la demanda de energía.

- El escenario desarrollado en (GP, 2005), debido a su carácter macroscópico, presupone una tasa de electrificación en 2050 igual a la actual. Por el contrario, para el desarrollo de este estudio se han desarrollado escenarios sub-sectoriales, alguno de ellos

con gran detalle, en los que se han introducido elementos que conducen a una electrificación creciente, en línea con las tendencias que actualmente cabe esperar incluso en el contexto BAU.

Para el caso del estudio de la cobertura de la demanda BAU en el año 2050 con energías renovables, además de la modulación horaria de la demanda directa de electricidad, también es relevante la distribución horaria de la demanda de hidrógeno, pues condicionará los requerimientos de infraestructura de generación y acumulación de hidrógeno para su correcta integración en el sistema energético y la adecuada cobertura de la demanda. La figura 644 recoge la modulación horaria de la demanda de hidrógeno⁹⁸³, en términos eléctricos equivalentes⁹⁸⁴ en barras de central, para el contexto BAU en el año 2050 en el caso con cobertura de la demanda con energías renovables⁹⁸⁵.

Figura 644. Distribución horaria de la demanda de hidrógeno, en términos eléctricos equivalentes, para el contexto BAU en el año 2050 y el caso de cobertura de la demanda basándose en energías renovables.



983 Esta demanda de hidrógeno es la que sustituye a la demanda de combustibles fósiles en el contexto BAU con mix BAU, y por tanto se destina a la cobertura de la parte de la demanda de combustibles no cubierta por la biomasa en los sectores transporte, edificación, industria, primario y usos no energéticos.

984 La demanda de hidrógeno la representamos en estos gráficos en forma de demanda eléctrica equivalente, para poder comparar directamente con los requerimientos de electricidad directa. Para obtener la demanda eléctrica equivalente, dividimos la demanda final de hidrógeno por los rendimientos de generación, transporte y distribución del hidrógeno, así como por el rendimiento de transporte y distribución de la electricidad empleada para generar el hidrógeno.

985 En el caso de cobertura de la demanda BAU, el contexto BAU no emplea hidrógeno como vector intermedio. Pero en el caso de cobertura con renovables de la demanda BAU, la demanda de combustibles fósiles se sustituye por hidrógeno generado con electricidad de origen renovable.

5.4.2 Demanda E3.0

En el caso del contexto E3.0, debido a los cambios asociados tanto a las tecnologías empleadas, a los niveles de eficiencia desplegados, y a la mayor electrificación del sistema, ya no es posible apoyarse en la modulación horaria cronológica de la demanda de electricidad experimentada en el pasado. Por este motivo, la modulación horaria de la demanda cronológica en el contexto E3.0 se apoya en los resultados de los análisis subsectoriales llevados a cabo.

En el caso del subsector edificación, con un gran peso en la modulación horaria actual de la demanda de electricidad, el grado de detalle del análisis desarrollado es mayor que en el resto de subsectores y, por tanto, la modulación horaria se basará en los resultados de las simulaciones realizadas sobre el parque de edificios tipo. En otros subsectores, el grado de detalle del análisis desarrollado es menor, por lo que tendremos que introducir hipótesis adicionales para obtener una primera aproximación de la modulación horaria de la demanda. En los siguientes puntos presentaremos la información subsectorial correspondiente a la evolución horaria de la demanda en cada sector. La resultante de la demanda horaria del sistema energético se obtendrá sumando las series horarias de demanda sectorial.

Por lo que se refiere a la demanda de electricidad directa⁹⁸⁶, nos encontramos con dos casuísticas distintas que afectan a la distribución horaria de la demanda, y que están principalmente asociadas a la forma en que se procede a la recarga de los vehículos eléctricos (EVs).

Uno de los casos analizados corresponde a la situación en que se procede a la recarga

nocturna de los vehículos eléctricos con la finalidad de allanar la curva de carga del sistema eléctrico. Esta opción de recarga ya presupone un considerable grado de gestión de la demanda, y requeriría la introducción de los mecanismos de precio adecuados para decantar la recarga de los vehículos eléctricos en las horas valle de la curva de demanda actual. Sin embargo, la gestión de la demanda asociada a esta estrategia de recarga es una gestión de la demanda apoyada en un sistema de generación gobernado por la oferta (la situación actual), y dominado por generación de origen no renovable, entre la que se encuentran centrales rígidas de carga base, y centrales para las que conviene maximizar su factor de capacidad con el fin de que se recuperen las inversiones en ellas realizadas (como los ciclos combinados operados con gas natural). Sin embargo, esta gestión de la demanda no se adapta tan bien a las condiciones de operación del sistema eléctrico en el contexto E3.0 por su excesiva rigidez. En efecto, la generación en el contexto E3.0 está basada exclusivamente en energías renovables, no existen centrales operando en carga base, y el objetivo de las centrales gestionables es complementar la generación del grueso del parque instalado, proporcionando los servicios complementarios de regulación necesarios para ello. Por este motivo, a la recarga nocturna de los vehículos eléctricos, enfocada a allanar la curva de demanda eléctrica actual, la denominamos recarga BAU. La figura 645 reproduce la secuencia horaria de la demanda de electricidad directa para este caso a lo largo de todo el año, mientras que las figuras 646 y 647 muestran la evolución horaria de la demanda en las semanas-1 (enero) y semana-30 (julio).

La otra opción considerada para la recarga de vehículos eléctricos es la de interacción bidireccional (V2G⁹⁸⁷) entre los EVs y el sistema

⁹⁸⁶ Denominamos electricidad directa al consumo de electricidad que no se emplea para la producción de hidrógeno.

⁹⁸⁷ V2G: vehicle to grid.

eléctrico, de tal forma que la capacidad de acumulación y potencia de los EVs pasan a constituir mecanismos de flexibilidad para la regulación del sistema eléctrico. En estas condiciones no existe una curva de demanda

eléctrica predeterminada, sino que esta se define dinámicamente en cada instante según la evolución de la demanda, la capacidad de generación, y la interacción con el parque de vehículos. Sin embargo, como

Figura 645. Evolución horaria de la demanda de electricidad directa (en barras de central) en el contexto E3.0 para el año 2050 para el caso de recarga BAU de los vehículos eléctricos (EVs), a lo largo de todo el año.

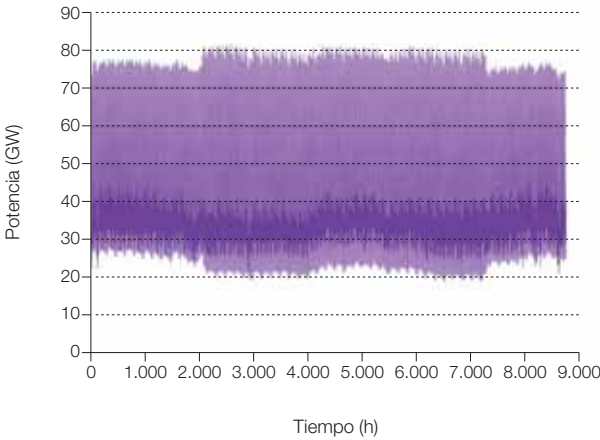


Figura 646. Evolución horaria de la demanda de electricidad directa (en barras de central) en el contexto E3.0 para el año 2050 para el caso de recarga BAU de los vehículos eléctricos (EVs), a lo largo de la semana-1 (enero).

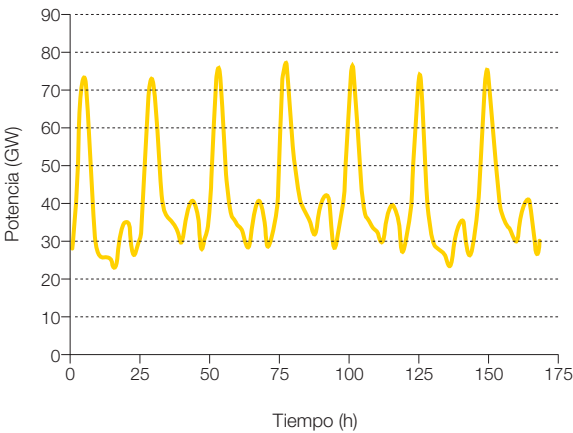
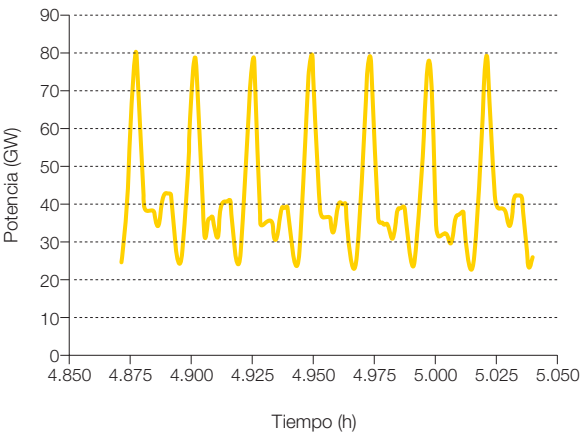


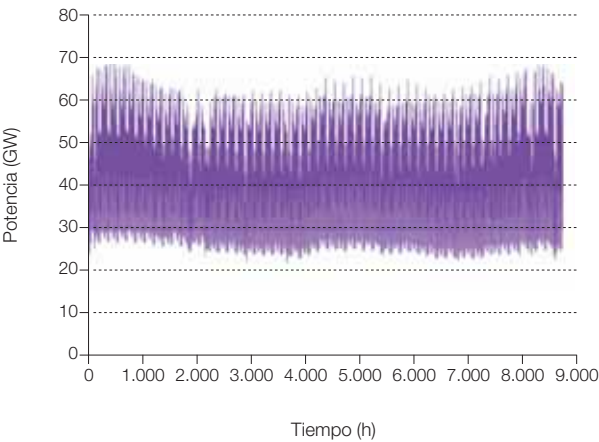
Figura 647. Evolución horaria de la demanda de electricidad directa (en barras de central) en el contexto E3.0 para el año 2050 para el caso de recarga BAU de los vehículos eléctricos (EVs), a lo largo de la semana-30 (julio).



punto de partida de las simulaciones de la cobertura de la demanda correspondientes a esta situación, hemos partido de una demanda inicial de electricidad directa, que incluye la demanda asociada al transporte eléctrico con la modulación horaria con la que se

cubre la demanda de movilidad. La modificación dinámica de la curva de demanda real tendrá lugar mediante la interacción de esta demanda potencial con la capacidad de las baterías y potencia de carga del parque de EVs. A esta modulación horaria de demanda

Figura 648. Evolución horaria de la demanda de electricidad directa (en barras de central) en el contexto E3.0 para el año 2050 para el caso de recarga V2G de los vehículos eléctricos (EVs) a lo largo de todo el año.



de electricidad directa la denominaremos V2G. En la figura 648 mostramos la modulación horaria de la demanda eléctrica para este caso a lo largo de todo el año, mientras que las figuras 649 y 650 muestran la evolu-

ción horaria de la demanda en las semanas-1 (enero) y semana-30 (julio). El otro vector energético para el que resulta relevante la distribución horaria de su demanda

Figura 649. Evolución horaria de la demanda de electricidad directa (en barras de central) en el contexto E3.0 para el año 2050 para el caso de recarga V2G de los vehículos eléctricos (EVs) a lo largo de la semana-1 (enero).

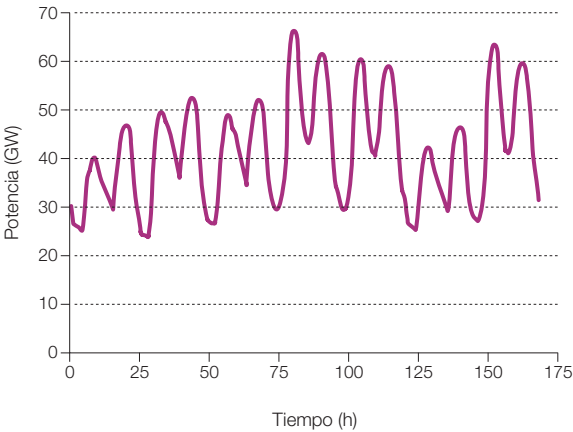
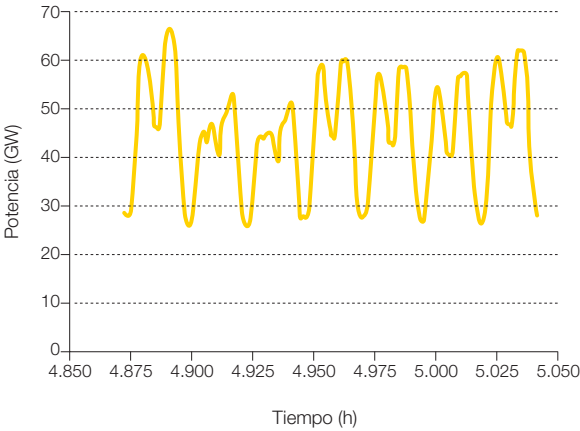


Figura 650. Evolución horaria de la demanda de electricidad directa (en barras de central) en el contexto E3.0 para el año 2050 para el caso de recarga V2G de los vehículos eléctricos (EVs) a lo largo de la semana-30 (julio).



es el hidrógeno, pues condicionará tanto la potencia a instalar de infraestructura de generación de hidrógeno, como la capacidad de acumulación necesaria para su correcta integración en el sistema energético y cobertura de la demanda. En la figura 651 recogemos la distribución horaria de la demanda de hidrógeno en uso final para el contexto E3.0 en el año 2050, y en términos eléctricos equivalentes.

5.4.2.1 Subsector edificación

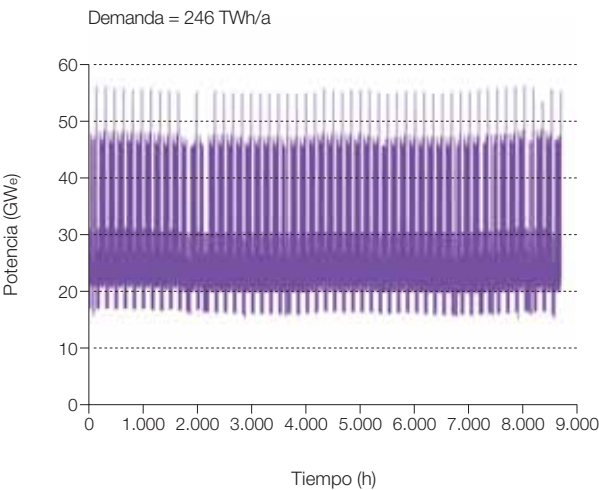
El sector edificación en el contexto E3.0 se encuentra totalmente electrificado.

Como ya se expuso anteriormente, el análisis del sector edificación se ha apoyado en la simulación dinámica de un parque de edificios tipo en los distintos emplazamientos climáticos provinciales. Esta metodología de análisis

nos permite retener correctamente los efectos de las medidas de eficiencia introducidas, tanto sobre la demanda de energía acumulada, como sobre su modulación horaria.

Combinando las series horarias de demanda eléctrica asociada a estas simulaciones con el reparto del área del parque de edificios por provincias y tipologías, hemos obtenido la modulación horaria de la demanda de electricidad en este subsector que aparece recogida en la figura 652. La figura 653 muestra la serie horaria correspondiente a la demanda del conjunto del parque de edificios terciario.

Figura 651. Distribución horaria de la demanda de hidrógeno en términos eléctricos equivalentes, para el contexto E3.0 y el año 2050.



5.4.2.2 Subsector transporte

La estructura de la demanda de energía final del transporte para el contexto E3.0 en el año

2050 es la que mostramos en la figura 654. Como puede observarse, aparte de la demanda de electricidad, que incluye la electricidad para los vehículos eléctricos (EVs) con

Figura 652. Demanda cronológica de electricidad del total del parque de edificios en el contexto E3.0 para el año 2050.

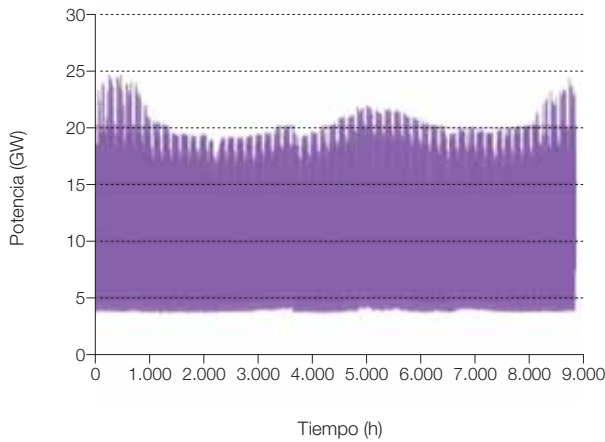
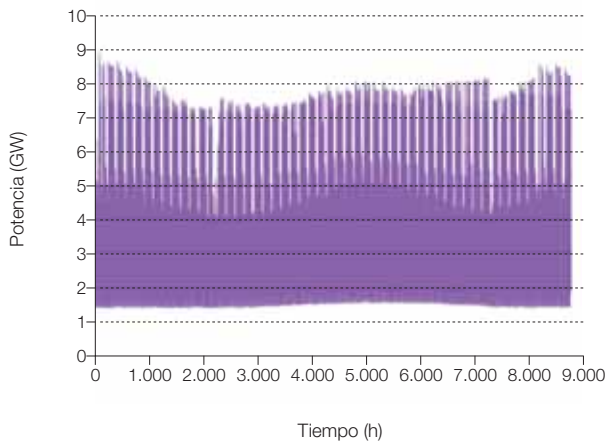


Figura 653. Demanda cronológica de electricidad del total del parque de edificios terciario en el contexto E3.0 para el año 2050.



batería, existe una gran parte de la demanda de energía final en forma de hidrógeno, y una contribución significativa de biocombustibles.

Por lo que respecta a la demanda de electricidad, es preciso distinguir entre la demanda directa de electricidad (tren, metro) y la que se suministra por medio de la recarga

de baterías. La figura 655 recoge esta descomposición para el contexto E3.0 y el año 2050.

Por lo que respecta a la distribución horaria de la demanda eléctrica para transporte, distinguimos, por un lado, la distribución horaria del servicio de movilidad, que consideramos

Figura 654. Estructura de la demanda de energía final del subsector transporte en el contexto E3.0 y el año 2050.

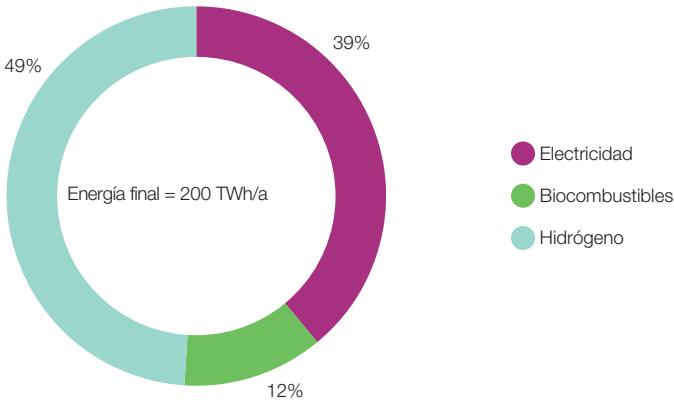
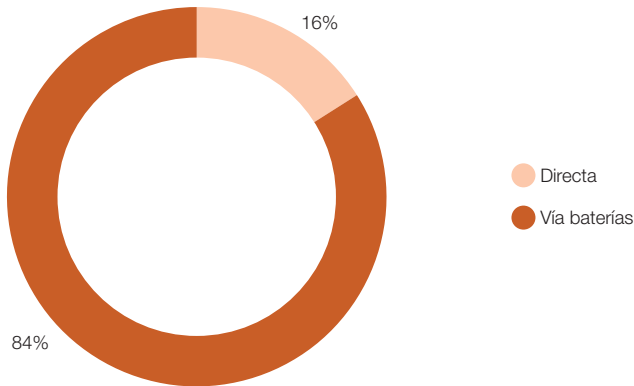


Figura 655. Estructura de la demanda final de electricidad para transporte en el contexto E3.0 y el año 2050, diferenciando entre la electricidad de consumo directo (tren, metro), y la suministrada para recargar las baterías de los EVs.



inflexible⁹⁸⁸, y por otro lado la demanda horaria de recarga de las baterías.

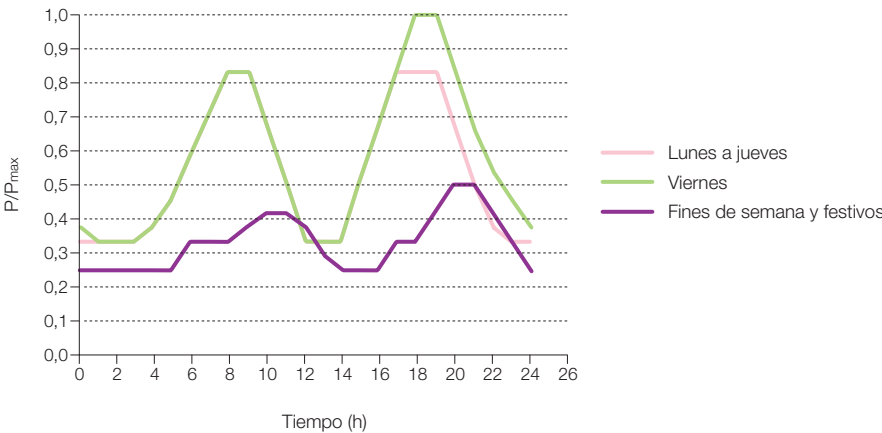
Puesto que no hemos localizado información sobre la distribución horaria de la demanda de movilidad, vamos a establecer una hipótesis sobre la misma, y dada la limitación en la precisión de su caracterización, la consideraremos común para los contextos BAU y E3.0. Resultaría muy conveniente poder enriquecer este análisis con información más detallada sobre la distribución horaria de la demanda de movilidad, pero su desarrollo queda fuera del alcance de este estudio.

La figura 656 recoge la modulación horaria empleada como primera aproximación para la demanda de movilidad eléctrica. Como puede verse, se distingue entre días laborables de lunes a jueves, el viernes y los fines de semana y festivos. La serie horaria anual correspondiente a esta modulación se aplicará tanto sobre la demanda de movilidad con electricidad directa, como sobre la demanda vía baterías en el caso V2G (integración de los EVs en el sistema eléctrico). Tal y

como comentábamos anteriormente, en el caso del V2G esta solicitud de demanda de movilidad se adaptará dinámicamente⁹⁸⁹ a lo largo del año para convertirse en una demanda de electricidad efectiva sobre el sistema eléctrico mediante los procesos de carga y descarga de los vehículos eléctricos⁹⁹⁰.

En el caso de la recarga BAU de los EVs, en la que se realiza la recarga de las baterías sin interacción bidireccional en un horario fijo asociado a la curva de carga actual del sistema eléctrico, la modulación horaria de la demanda eléctrica de los vehículos dotados de baterías queda totalmente desacoplada de la demanda de movilidad. Esta opción representa una recarga lenta (baja potencia de conexión), que se extiende sobre un periodo relativamente prolongado de tiempo. De las curvas de carga actuales del sistema eléctrico, podemos deducir que el valle se extiende de 23 h a 9 h, con un mínimo no simétrico a las 5 h. Basándonos en esta información, la modulación horaria de la recarga BAU de las baterías de los EVs que hemos adoptado es la recogida en la figura 657.

Figura 656. Modulación horaria de la demanda de movilidad para los modos eléctricos de transporte.

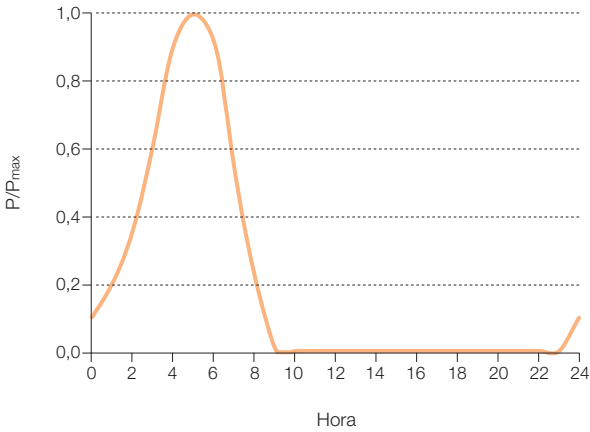


988 Esta hipótesis consideramos que es conservadora en el sentido en que cabe esperar que en el marco de un sistema económico y social inteligente, la demanda de movilidad pudiera responder en cierta medida a las posibilidades del sistema energético. Sin embargo, a pesar de la rigidez de la demanda de movilidad, la existencia de las baterías proporciona un cierto grado de flexibilidad a la demanda de energía para el transporte.

989 Por este motivo, para el caso V2G no existe una curva de carga determinista que se pueda predecir a priori.

990 Debe tenerse en cuenta que para los procesos de carga/descarga por inducción ya se están planteando, e incluso ofertando, opciones de interacción V2G dinámica, en la que el EV interactúa con la red eléctrica estando en marcha, por lo que el desacoplamiento que introduce la V2G estática al requerir que el vehículo esté estacionado se va diluyendo. Idealmente, la interacción óptima del EV con la red debe estar gobernada por los requerimientos del sistema eléctrico y de movilidad, independientemente de que el vehículo se encuentre estacionado o en marcha.

Figura 657. Modulación horaria del proceso de recarga nocturna de las baterías de los vehículos eléctricos.



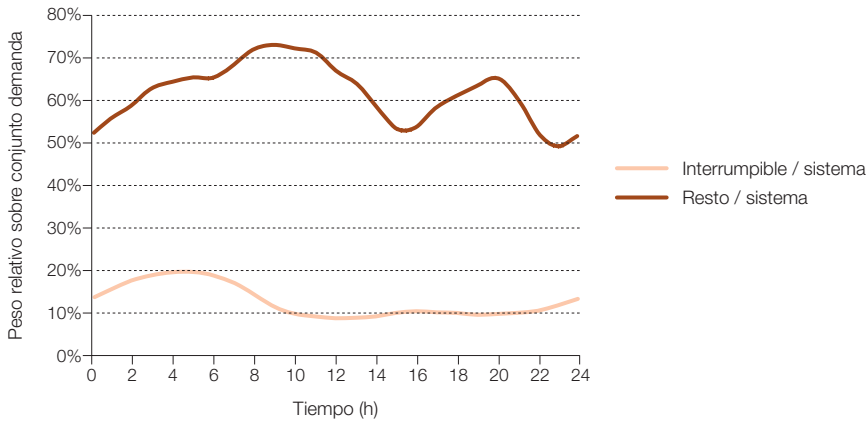
5.4.2.3 Resto de subsectores

Para el subsector industrial y el resto de subsectores energéticos tampoco hemos localizado información detallada de la estructura de consumo horario, y dado que queda fuera del alcance de este estudio el desarrollarla, hemos adoptado una primera aproximación⁹⁹¹

basada en los resultados del proyecto INDEL⁹⁹², pero resultaría muy conveniente enriquecer este análisis con una información más detallada de la estructura horaria de estos consumos de electricidad.

La figura 658 recoge la evolución horaria del peso relativo sobre la demanda total de

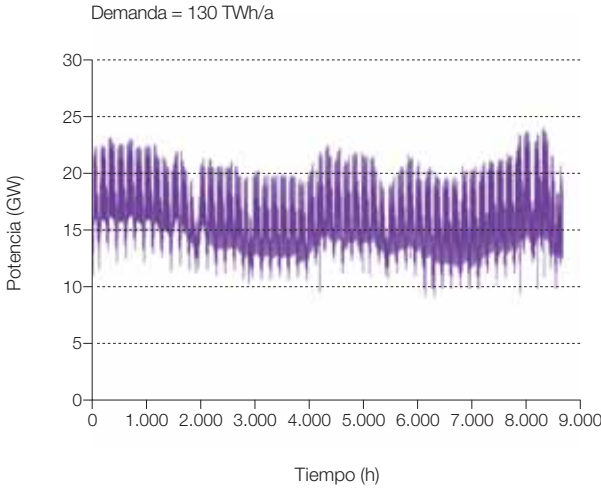
Figura 658. Evolución horaria del peso relativo sobre la demanda eléctrica del sector industrial interruptible y del resto de consumos industriales y de servicios (resto), según resultados del proyecto INDEL.



⁹⁹¹ Es de notar que dada la creciente electrificación planteada para el contexto E3.0, la caracterización de la distribución horaria de la demanda en sectores como el industrial debería ir más allá de la demanda de electricidad para abarcar la demanda total de energía final.

⁹⁹² REE, "Atlas de la demanda eléctrica Española. Proyecto INDEL, 1998.

Figura 659. Distribución horaria de la demanda de electricidad para los subsectores industria, primario y servicios, en el contexto E3.0 para el año 2050.



electricidad de la demanda de las industrias interrumpibles, y la demanda del resto de consumos industriales y de servicios.

En estas condiciones, la distribución horaria resultante de la demanda de electricidad en los sectores industria, primario y servicios públicos en el contexto E3.0 para el año 2050 es la que se aprecia en la figura 659.

5.5. Cobertura de demanda BAU

En este punto, partiendo de los escenarios de demanda y costes anteriormente presentados, vamos a proceder a analizar la cobertura de la demanda en el contexto BAU, con el objetivo final de determinar los costes relativos y absolutos asociados a esta cobertura de la demanda.

En el contexto de demanda BAU, el caso principal a considerar es aquel asociado a un mix de generación BAU. Sin embargo, adicionalmente desarrollaremos un caso correspondiente a la cobertura de la demanda BAU con un mix de generación 100% renovable. Este caso nos permitirá disponer de una cuantificación de las implicaciones de acometer una transición de nuestro sistema energético hacia un sistema 100% basado en energías renovables, pero con un planteamiento exclusivamente gobernado desde el lado de la oferta, en el que el despliegue de eficiencia e inteligencia en el sistema energético no

acompañan a la introducción de energías renovables. Por tanto, este caso con cobertura renovable de la demanda BAU bien podría considerarse como el BAU de introducción de renovables en el que nos encontramos inmersos. El hecho de tener esta opción cuantificada, nos permitirá extraer unas conclusiones más claras del efecto asociado a los despliegues de inteligencia y eficiencia por el sistema energético.

5.5.1 Cobertura de la demanda con generación BAU

En este punto recogemos el análisis correspondiente a la cobertura de la demanda BAU con generación BAU.

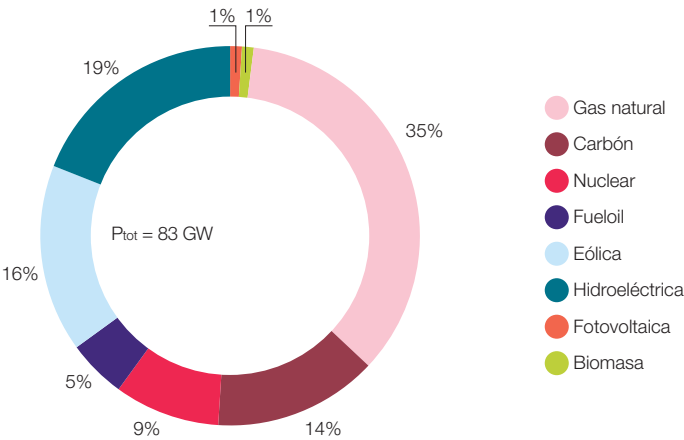
5.5.1.1. Electricidad BAU

La estructura de los mix de generación eléctrica BAU, para los años 2007 y 2050, y tanto en términos de potencia instalada como de

contribución a la cobertura de la demanda se encuentra en las figuras 660 a 663.

Por lo que respecta al mix BAU para el año 2050, toma como punto de partida el escenario para el año 2020 elaborado⁹⁹³ en 2010 por la subcomisión de análisis de la estrategia energética española, que incrementa las potencias para cubrir la demanda BAU 2050, y reduce los factores de capacidad de las tecnologías “convencionales” para regular la creciente participación renovable, y de las renovables por no conseguir integrar toda su capacidad de generación como consecuencia de la rigidez del sistema.

Figura 660. Estructura de la potencia del mix de generación eléctrica para el BAU en 2007.



993 Comisión de Industria, Turismo y Comercio, “Informe de la subcomisión de análisis de la estrategia energética española para los próximos 25 años”, Congreso de los Diputados, noviembre 2010.

Figura 661. Estructura de la generación eléctrica para el mix BAU en 2007.

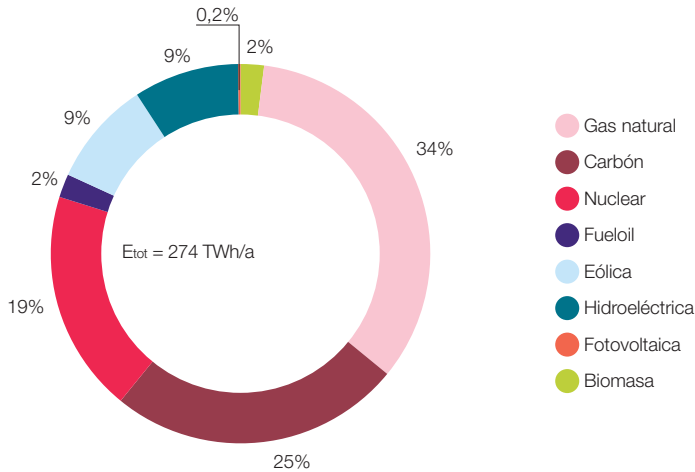


Figura 662. Estructura de la potencia del mix de generación eléctrica para el BAU en 2050.

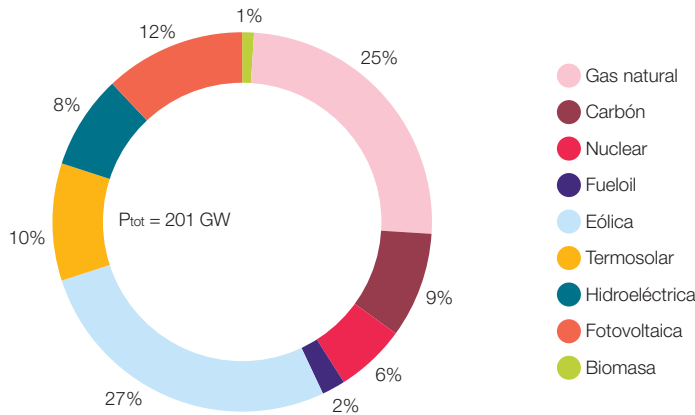
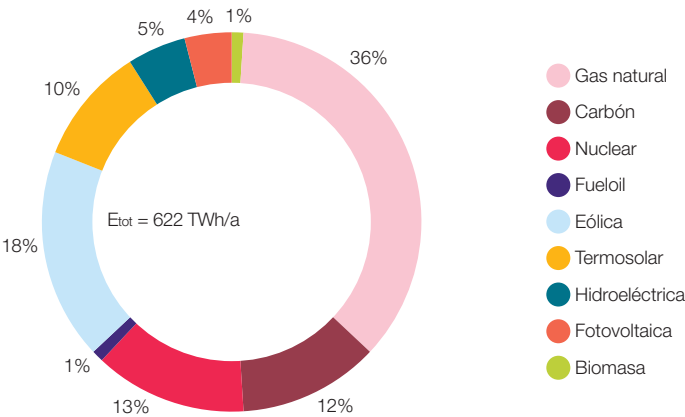


Figura 663. Estructura de la generación eléctrica para el mix BAU en 2050.
La generación eléctrica mostrada es en barras de central, e incluyen los efectos del bombeo hidroeléctrico.



5.5.1.2 Combustibles BAU para uso no eléctrico

En este punto recogemos la estructura del consumo de combustibles adicionales a los empleados para generación de electricidad, necesarios para cubrir la demanda BAU.

En las figuras 664 y 665 mostramos la estructura del consumo de combustibles adicionales a los empleados para la generación eléctrica en el contexto BAU para los años 2007 y 2050. Los resultados para el año 2007 se corresponden a distribuir la demanda en la fecha inicio del desarrollo de los escenarios según los repartos porcentuales correspondientes al balance de la AIE para el año 2007. En ambos casos se excluyen las aportaciones de la energía solar térmica, cuyo efecto será sin embargo incorporado para la evaluación de costes.

Figura 664. Estructura del consumo de combustibles en el BAU 2007.

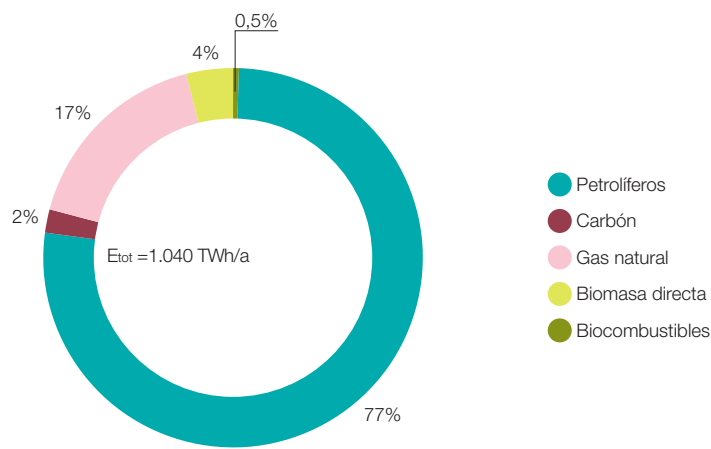
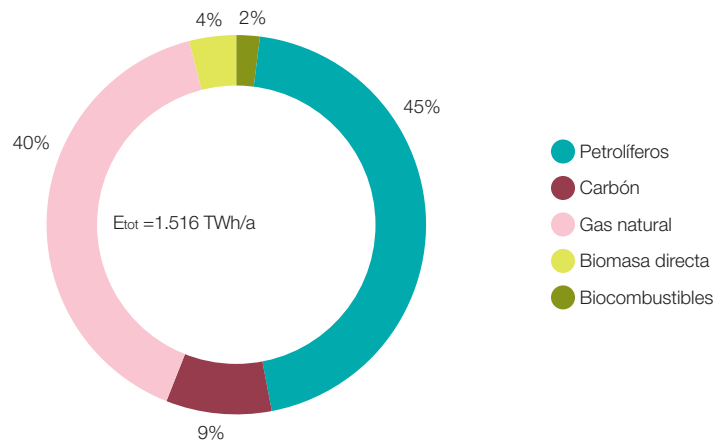


Figura 665. Estructura del consumo de combustibles en el BAU 2050.



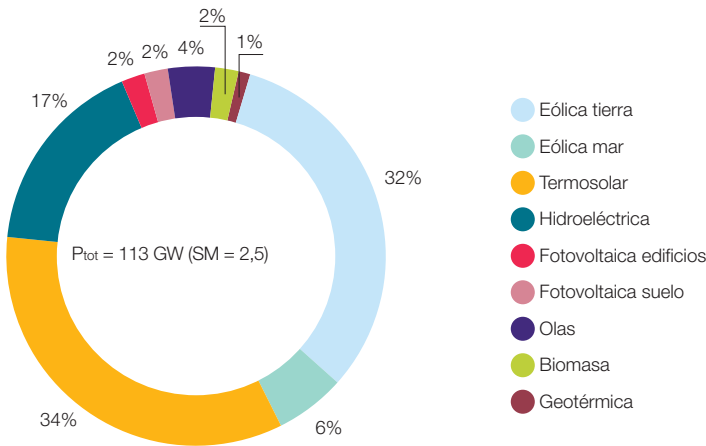
5.5.2 Cobertura de la demanda con
generación renovable

En este caso, partimos de la demanda BAU y procedemos a analizar la cobertura de dicha demanda con un sistema de generación 100% renovable.

El planteamiento para la cobertura de la demanda en este caso es el de integración vía electricidad apuntado en el informe R100% (GP, 2007), en el cual el excedente de la capacidad de generación asociada a la cobertura de la demanda de electricidad directa se emplea para producir hidrógeno, que da cobertura al grueso de la demanda de combustibles en el contexto BAU. Por tanto, partiendo de un mix de generación renovable con capacidad de dar cobertura a la demanda directa de electricidad, procedemos a sobredimensionar su capacidad de generación hasta que el excedente de capacidad de generación eléctrica proporcione la electricidad necesaria para generar el hidrógeno requerido.

El punto de partida para el desarrollo del análisis de la cobertura de la demanda en el contexto BAU, es el mix de generación presentado en el informe R100% como mix-27⁹⁹⁴, y que obedecía a un caso con diversidad tecnológica⁹⁹⁵ que proporcionaba capacidad de cobertura total de la demanda. Para el escenario de demanda correspondiente al informe R100%, el mix-27 dotado de 1,5 TWh de capacidad de acumulación, tenía un múltiplo solar⁹⁹⁶ de SM = 2,5, y proporcionaba una cobertura total de la demanda⁹⁹⁷ (SF = 100%). La regulación de este mix-27 para cubrir la demanda conducía a una disipación de capacidad de generación equivalente al 34% de la demanda eléctrica que cubría⁹⁹⁸. Los costes específicos⁹⁹⁹ y normalizados de la energía proporcionada por este mix-27 en los instantes inicial y final del periodo considerado^{1.000} eran de LEC₂₀₀₇ = 14,8 c€/2007/kWh y LEC₂₀₅₀ = 5,1 c€/2007/kWh. La figura 666 reproduce la distribución de potencia instalada en este mix-27, mientras que la figura 667 reproduce la estructura de su generación, todo

Figura 666. Potencia instalada en el mix-27 del estudio R100% (GP, 2007). Este mix ha sido el adoptado como punto de partida para el análisis de la cobertura de la demanda con renovables en el contexto BAU.



994 Los resultados de este mix se pueden encontrar en las págs. 347-351 del informe R100% (GP, 2007).

995 En R100% se presentaban también otros mix con capacidad de cobertura del 100% de la demanda eléctrica y con un coste sensiblemente inferior, obtenidos mediante un proceso de optimización acoplada de la expansión de la generación y el despacho de energía. Sin embargo, estos mix "óptimos" desde un punto de vista económico eran por lo general mix de generación bastante menos diversos.

996 Al igual que en el informe R100% (GP, 2007), vamos a emplear el múltiplo solar (SM) para caracterizar el tamaño relativo del mix de generación considerado en relación a la demanda. El SM lo definimos como el cociente entre la potencia nominal del mix de generación, y el máximo de la demanda horaria a la que se somete el mix de generación.

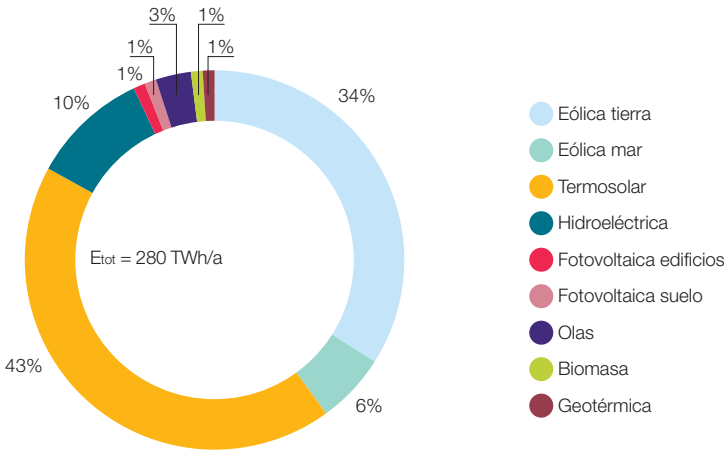
997 Al igual que en el informe R100% (GP, 2007), vamos a emplear la fracción solar (SF) para indicar el grado de cobertura de la demanda. La SF la definimos como el cociente entre la cobertura de la demanda proporcionada por el mix de generación considerado, y la demanda total.

998 Este excedente de capacidad de generación es el que se puede redireccionar hacia la producción de hidrógeno en el caso de integrar el sistema energético.

999 En este caso referidos a energía en barras de central.

1.000 Estos costes no coinciden exactamente con los presentados en el informe R100% porque hemos realizado diversas adaptaciones para expresarlos en términos compatibles con este informe: conversión de €-2003 (la unidad de costes empleada en el informe R100%) a €-2007 (la unidad de costes empleada en este informe); trasladar el instante inicial desde el año 2003 (empleado en el informe R100%) al año 2007 (el adoptado para este informe).

Figura 667. Generación eléctrica con en el mix-27 del estudio R100% (GP, 2007). Este mix ha sido el adoptado como punto de partida para el análisis de la cobertura de la demanda con renovables en el contexto BAU.



ello al someterlo a la demanda del escenario 2050 considerada en el informe R100% (GP, 2007), que es el que se desarrolló en el informe R2050 (GP, 2005).

Sin embargo, es preciso adaptar este mix de generación para su aplicación al escenario BAU de este informe. En efecto, por un lado, la demanda de electricidad del escenario BAU de este informe es considerablemente superior^{1.001} a la del escenario empleado en el informe R100% (GP, 2007), por lo que el mix-27 no tendría capacidad de cubrir la demanda de electricidad directa. Pero además, ahora estamos planteando un sistema energético integrado, en el cual, el mix de generación renovable debe tener capacidad de cubrir el grueso de la demanda de combustibles además de la demanda eléctrica directa.

Para ilustrar este hecho, la figura 668 muestra el resultado del análisis de la cobertura de la demanda del mix-27 al someterlo a la demanda de electricidad directa del escenario BAU para el año 2050 desarrollado en este

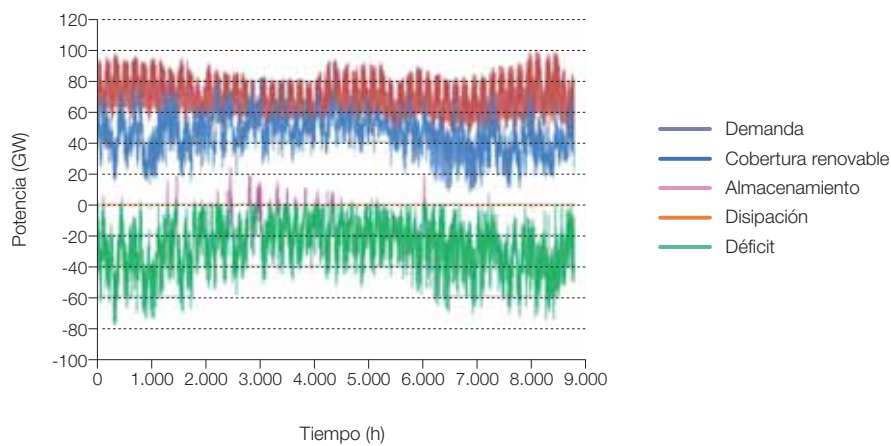
informe. El múltiplo solar de este mix con la demanda BAU 2050 ahora considerada se ve reducido a $SM = 1,1$, y la cobertura de la demanda de electricidad directa que nos proporciona se ve reducida a $SF_{electricidad} = 64,3\%$, con una disipación nula de la capacidad de generación, lo cual proporciona una cobertura de la demanda total del sistema integrado de $SF_{tot} = 10,9\%$, y una generación relativamente elevada de la potencia de biomasa instalada, que opera con un $CF = 95,4\%$ consumiendo 63 TWh/a de biomasa. En la figura 668 también podemos apreciar la distribución horaria del déficit^{1.002} de cobertura de la demanda de electricidad directa, extendida a todo el año y alcanzando potencias pico del orden de 80 GW, además de la escasa participación de la capacidad de acumulación, consecuencia directa del fuerte infra dimensionado de este mix en relación a la demanda a la que se encuentra sometido^{1.003}.

1.001 Como consecuencia de varios factores, siendo los principales: escenario poblacional muy superior, mayor electrificación de todos los sub-sectores energéticos, y una metodología bastante más detallada para elaborar los escenarios.

1.002 Presentado en el eje negativo para poder observarlo claramente.

1.003 Otra información presentada en los pies de figura para cada uno de estos mix de generación es el múltiplo solar (SM), la cobertura de la demanda eléctrica ($SF_{electricidad}$), la cobertura de la demanda total (SF_{tot}), la fracción de la generación que se disipa por ausencia de integración del sistema energético ($F_{disipada}$), y la ocupación del territorio como porcentaje del área total del territorio peninsular ($A_{territorio}$). Por lo que respecta a la ocupación del territorio se debe resaltar que solo se ha considerado la instalación de generación renovable en los espacios actualmente no empleados para otro uso (incluidos entre estos las figuras de protección ambiental, que suponen el 28% del territorio), según los criterios y resultados del informe (R2050, 2005) dedicado al análisis del potencial de las energías renovables en la España peninsular. El valor mostrado de ocupación del territorio incluye tanto el efecto de las instalaciones de generación como el de las de T&D eléctrica.

Figura 668. Análisis de la cobertura de la demanda del mix-27 del informe R100% (GP, 2007) al someterlo a la demanda de electricidad directa del escenario BAU de este informe. $SM = 1,1$; $SF_{el\acute{e}ctrica} = 64,3\%$; $SF_{tot} = 10,9\%$; $F_{disipada} = 0\%$; $A_{territorio} = 3,2\%$.



Por tanto, en primera instancia procedemos a incrementar la potencia instalada con vistas a obtener un mix de generación con capacidad para dar cobertura a la demanda de energía eléctrica directa BAU 2050. Para incrementar

la potencia instalada, hemos tenido en cuenta el potencial y costes de las distintas tecnologías recogidas en los informes R2050 (GP, 2005) y R100% (GP, 2007), que empuja la potencia fotovoltaica hacia valores más elevados

Figura 669. Distribución de potencia instalada por el mix-3b orientado a la cobertura de la demanda de electricidad directa BAU 2050. $SM = 2,2$; $C = 3$ TWh; $SF_{el\acute{e}ctrica} = 97,2\%$; $SF_{tot} = 16,5\%$; $F_{disipada} = 26,7\%$; ; $A_{territorio} = 5,5\%$; $LEC_{2007} = 17,6$ c€/2007/kWh; $LEC_{2050} = 6,2$ c€/2007/kWh.

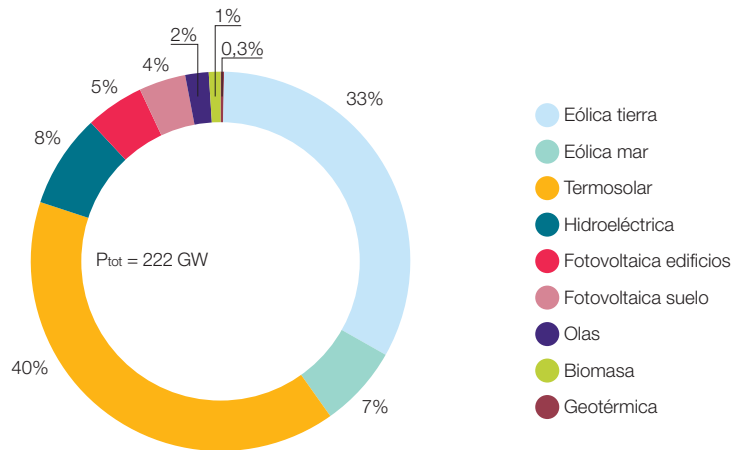


Figura 670. Distribución de generación por el mix-3b orientado a la cobertura de la demanda de electricidad directa BAU 2050. SM = 2,2; C = 3 TWh; SF_{eléctrica} = 97,2% ; SF_{tot} = 16,5% ; F_{disipada} = 26,7%; A_{territorio} = 5,5%; LEC₂₀₀₇ = 17,6 c€/2007/kWh; LEC₂₀₅₀ = 6,2 c€/2007/kWh.

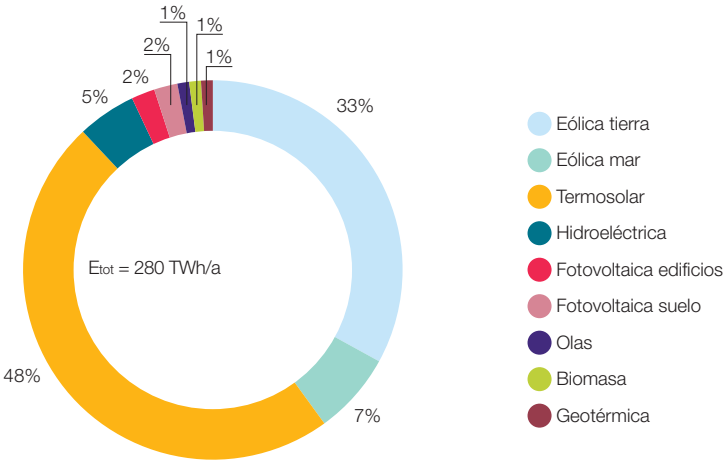
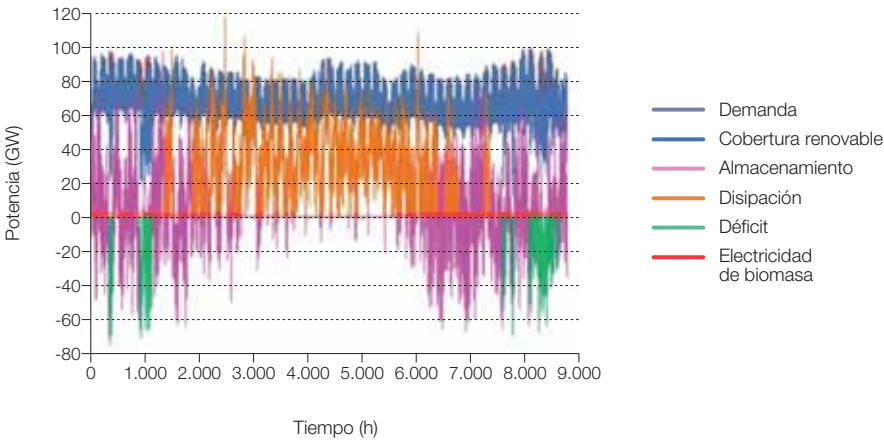


Figura 671. Cobertura de la demanda para el mix-3b. Capacidad de generación orientada a la cobertura de la demanda eléctrica BAU 2050. SM = 2,2; C = 3 TWh; SF_{eléctrica} = 97,2% ; SF_{tot} = 16,5% ; F_{disipada} = 26,7%; A_{territorio} = 5,5%; LEC₂₀₀₇ = 17,6 c€/2007/kWh; LEC₂₀₅₀ = 6,2 c€/2007/kWh.



de potencia instalada, para recoger su evolución en los últimos años y los objetivos actuales de despliegue de esta tecnología. A este mix lo vamos a denominar mix-3b. La figura 669 nos muestra la distribución de potencia instalada por este mix-3b, que con 222 GW alcanza un $SM = 2,2$, y además implementa una capacidad de acumulación eléctrica de 3 TWh. La figura 670 nos muestra la distribución de la generación de este mix, que con una generación en barras de central de 600 TWh/a proporciona una $SF_{\text{eléctrica}} = 97,2\%$ y una disipación por requerimientos de regulación del 26,7% de la demanda eléctrica a la que está sometido ($F_{\text{disipación}} = 26,7\%$). La cobertura total de la demanda en ausencia de integración del sistema energético sería de $SF_{\text{tot}} = 16,5\%$, y los correspondientes costes normalizados de generación eléctrica vendrían caracterizados por $LEC_{2007} = 17,6 \text{ c€-2007/kWh}$ y $LEC_{2050} = 6,2 \text{ c€-2007/kWh}$.

La figura 671 nos muestra el análisis de la cobertura de la demanda de electricidad directa para el mix-3b.

Como podemos apreciar, el déficit de cobertura de la demanda se encuentra bastante localizado al inicio y al final de año, lo que representa en términos energéticos una proporción pequeña de la demanda (2,8%), pero requiere potencias elevadas para su cobertura. Por tanto, la cobertura de este déficit se podría cubrir de forma efectiva con un mecanismo de flexibilización de la generación, como es la hibridación con biomasa de la capacidad de generación asociada a las centrales termosolares. Las elevadas potencias de carga y descarga del almacenamiento que podemos apreciar en esta figura, implican que la capacidad de acumulación termosolar^{1.004} debe participar en la regulación del sistema, y apoyar al bombeo hidroeléctrico instalado. Por último, esta figura nos muestra también la

distribución temporal de la capacidad de generación disipada para regular el sistema eléctrico. Esta disipación es la que se trataría de integrar con el resto del sistema para producir hidrógeno. Sin embargo, esta disipación asciende en el mix-3b a 165 TWh/a, y se requiere una generación adicional de 2877 TWh/a para alcanzar una cobertura completa del total de la demanda de energía ($SF_{\text{tot}} = 100\%$). Este gran exceso de capacidad de generación adicional para cubrir la demanda del BAU en 2050, traerá como consecuencia el requerimiento de un gran sobredimensionado del parque de generación, lo cual proporciona a su vez un mecanismo adicional de flexibilidad y regulación para la cobertura de la demanda eléctrica, haciendo que la hibridación termosolar pueda resultar innecesaria para el mix-3b, con lo que sus costes de generación eléctrica se reducirían a $LEC_{2007} = 15,3 \text{ c€-2007/kWh}$ y $LEC_{2050} = 5,0 \text{ c€-2007/kWh}$.

Por último, la figura 672 muestra la evolución del estado de carga ($FSOC^{1.005}$) de la acumulación eléctrica para el caso-3b. Como podemos observar, a principio y a final del año, la capacidad de acumulación se llega a vaciar^{1.006}, mientras que en la parte central del año se encuentra totalmente llena y por tanto no puede absorber el exceso de capacidad de generación, lo que contribuye a que la disipación se centre en esta parte del año.

Como hemos visto en el caso-3b anteriormente presentado, la cobertura de la demanda total en el BAU 2050 basada en energías renovables exige un sobredimensionado considerable del parque generador. Para obtener una primera aproximación a la potencia adicional necesaria, hemos partido del mix de potencia adicional reflejado en la figura 673, que reproduce el potencial y estructuras de coste de las distintas tecnologías, si bien

1.004 El diseño de la central termosolar que se empleó para caracterizar la capacidad de generación horaria y los costes de esta tecnología en el informe RE100% (GP, 2007) contaba con 15 h de acumulación.

1.005 FSOC (fractional state of charge), representa en términos relativos a la capacidad de acumulación total el estado de carga de la acumulación.

1.006 Alcanzando el estado de carga mínimo (10%) que hemos admitido para mantener un cierto nivel de seguridad de operación.

Figura 672. Evolución de la capacidad de acumulación del sistema eléctrico para el mix-3b. Capacidad de generación orientada a la cobertura de la demanda eléctrica BAU 2050. SM = 2,2; C = 3 TWh; SF_{eléctrica} = 97,2% ; SF_{tot} = 16,5% ; F_{disipada} = 26,7% ; A_{territorio} = 5,5%; LEC₂₀₀₇ = 17,6 c€/2007/kWh; LEC₂₀₅₀ = 6,2 c€/2007/kWh.

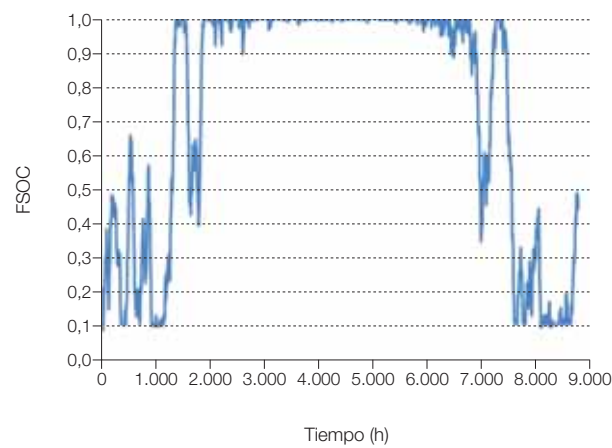
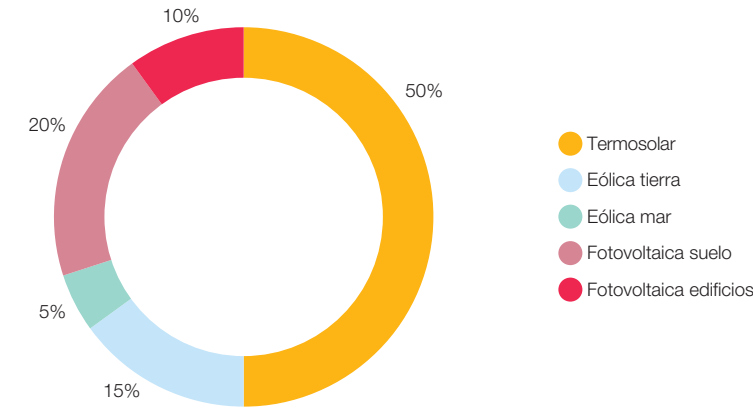


Figura 673. Estructura del mix de generación de potencia adicional necesaria para cubrir el total de la demanda de hidrógeno.



fuerza más allá de lo económicamente justificable la participación de la fotovoltaica para reflejar la gran capacidad de despliegue que esta tecnología ha demostrado durante los últimos años.

Figura 674. Distribución de la potencia instalada en el mix-4b2 dimensionado para la cobertura de la demanda total BAU 2050. SM = 10,6; C = 1,5 TWh; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{disipada} = 0%; A_{territorio} = 18,9%; LEC₂₀₀₇ = 15,5 c€-2007/kWh; LEC₂₀₅₀ = 4,4 c€-2007/kWh.

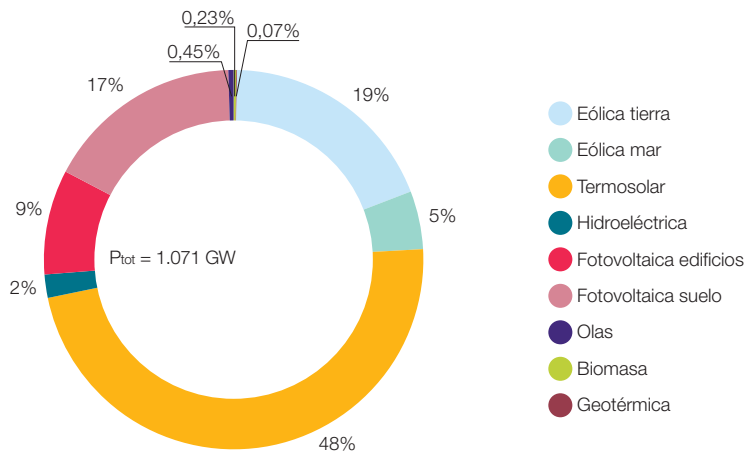
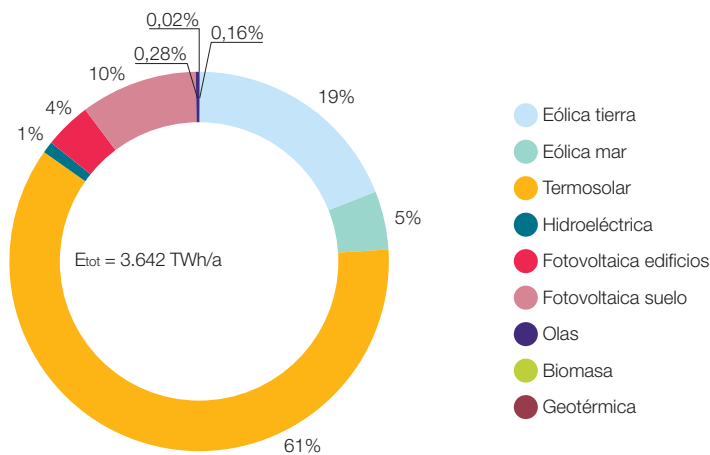


Figura 675. Estructura de la generación eléctrica del mix-4b2 dimensionado para la cobertura de la demanda total BAU 2050. SM = 10,6; C = 1.5 TWh; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{disipada} = 0%; A_{territorio} = 18.9%; LEC₂₀₀₇ = 15,5 c€-2007/kWh; LEC₂₀₅₀ = 4,4 c€-2007/kWh.



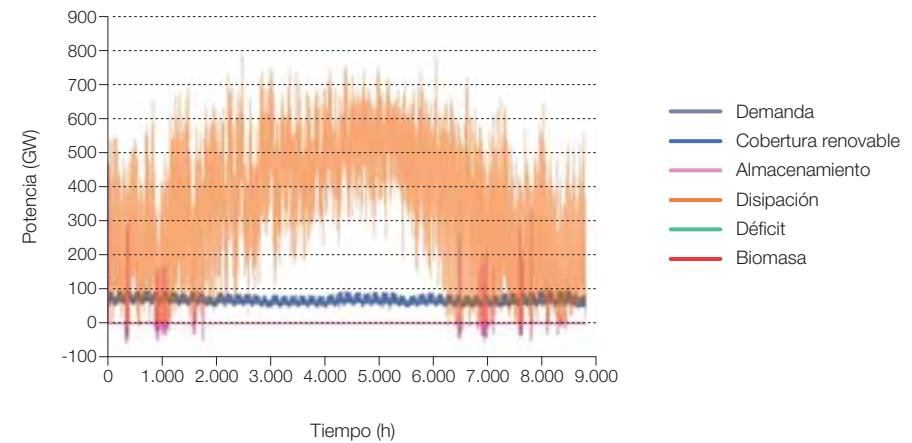
El caso-4b2 que recogemos a continuación, proporciona una cobertura total de la demanda ($SF_{\text{eléctrica}} = 100\%$; $SF_{\text{tot}} = 100\%$), para lo cual requiere la instalación de un múltiplo solar^{1.007} de $SM = 10,6$. La figura 674 nos presenta la estructura de la potencia instalada en el mix-4b2, con un total de 1071 GW, mientras que la figura 675 presenta la distribución de la cobertura de la demanda total de electricidad (directa y para generación de hidrógeno) entre las distintas tecnologías. El gran exceso de potencia para proporcionar cobertura de la demanda total, hace que no sean necesarios mecanismos de flexibilidad adicionales para la cobertura de la demanda eléctrica, como la hibridación termosolar, por lo que los costes de la electricidad producida serían en este caso^{1.008} de $LEC_{2007} = 15,5 \text{ c€-2007/kWh}$ y $LEC_{2050} = 4,4 \text{ c€-2007/kWh}$.

En la figura 676 reproducimos el resultado del proceso de análisis de la cobertura de la demanda de electricidad directa para el mix-

4b2. En esta figura apreciamos el dominio de la “disipación” del sistema eléctrico, que en este caso de sistema energético integrado se usa en su totalidad para producir el hidrógeno requerido.

El gran excedente de capacidad de generación del mix-4b2, en relación a la demanda de electricidad directa, proporciona la potencia “disipada” por el sistema eléctrico que mostrábamos en la figura anterior, y que actúa como suministro al sistema de generación de hidrógeno. Por tanto, para completar el análisis de la cobertura de demanda, es preciso analizar el proceso de generación y acumulación de hidrógeno a partir de esta potencia eléctrica “disipada”, con su correspondiente modulación horaria anual. En efecto, tanto la potencia de generación de hidrógeno (hidrolizador) a instalar, como la capacidad de acumulación de hidrógeno necesaria por el sistema, dependen de la distribución horaria de la potencia eléctrica disipada que es preciso

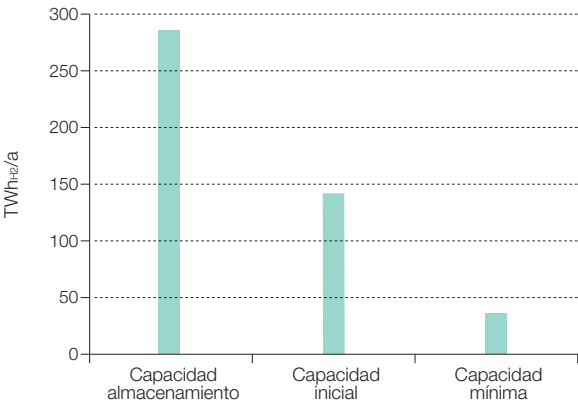
Figura 676. Cobertura de la demanda de electricidad directa para el mix-4b2, dimensionado para la cobertura de la demanda total BAU 2050. $SM = 10,6$; $C = 1,5 \text{ TWh}$; $SF_{\text{eléctrica}} = 100\%$; $SF_{\text{tot}} = 100\%$; $F_{\text{disipada}} = 0\%$; $A_{\text{territorio}} = 18,9\%$; $LEC_{2007} = 15,5 \text{ c€-2007/kWh}$; $LEC_{2050} = 4,4 \text{ c€/kWh}$.



1.007 Para facilitar la comparación entre todos los casos, el denominador del múltiplo solar siempre es el máximo horario de la demanda de electricidad directa a la que se ve sometido el mix de generación.

1.008 Si se quisiera instalar la capacidad adicional de regulación que proporciona la hibridación termosolar para la electricidad directa como elemento de seguridad de suministro, dado el gran sobredimensionado del mix de generación en relación a la demanda de electricidad directa, los costes de la electricidad se modificarían muy poco: $LEC_{2007} = 15,9 \text{ c€-2007/kWh}$ y $LEC_{2050} = 4,6 \text{ c€/kWh}$.

Figura 677.Requerimientos de acumulación de hidrógeno, capacidad inicial y capacidad mínima anual del sistema de acumulación de hidrógeno, para el mix-4b2, dimensionado para la cobertura de la demanda total BAU 2050. SM = 10,6; SF_{tot} = 100% ; F_{disipada} = 0%; A_{territorio} = 18,9%.



integrar para la generación de hidrógeno. Infra dimensionar la capacidad de generación de hidrógeno o la capacidad de acumulación del mismo, conduciría a la incapacidad de integrar toda la disipación eléctrica y, por tanto, al requerimiento de sobredimensionado adicional del parque generador para conseguir alcanzar la cobertura total de la demanda. La figura 677 recoge el resultado del proceso de dimensionado de la capacidad de acumulación de hidrógeno que permite obtener una cobertura total de la demanda (SF_{tot} = 100%) para el mix-4b2. Como podemos observar se requieren 282 TWh_{H2} de capacidad de acumulación, equivalente a una reserva de 72 días, para no desperdiciar capacidad de generación proporcionada por el mix-4b2. Sin embargo, el estado de carga de la capacidad de acumulación va variando a lo largo del año, y alcanza un mínimo de 37 TWh_{H2} el 16 de febrero, correspondiente a una reserva de nueve días. A principio de año, la cantidad de hidrógeno almacenado es de 142 TWh_{H2}, equivalente a una reserva de 36 días.

La figura 678 presenta la evolución de la potencia de carga y descarga de la acumulación de hidrógeno (en términos eléctricos equivalentes), mientras que la figura 679 muestra la evolución del estado de carga de la reserva total de hidrógeno a lo largo del año. Adicionalmente, a esta capacidad de acumulación de hidrógeno se requiere una potencia total de generación de hidrógeno^{1.009} de 799 GW_e. El impacto de esta infraestructura de generación y acumulación de hidrógeno sobre el coste del total de la energía se presentará en el siguiente punto^{1.010}.

1.009 Nótese que esta potencia es superior a la máxima potencia de carga de la acumulación de hidrógeno debido a la simultaneidad entre generación y consumo.

1.010 Los costes que estamos proporcionando en este apartado se corresponden tan solo a la producción de electricidad.

Figura 678. Evolución de las potencias de carga y descarga del sistema de acumulación de hidrógeno para el mix-4b2, dimensionado para la cobertura de la demanda total BAU 2050. SM = 10,6; SF_{tot} = 100% ; F_{dissipada} = 0%; A_{territorio} = 18,9%.

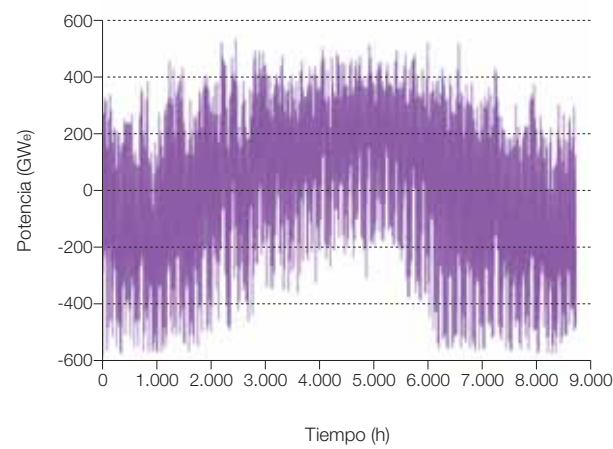


Figura 679. Evolución del estado de carga del sistema de acumulación de hidrógeno para el mix-4b2, dimensionado para la cobertura de la demanda total BAU 2050. SM = 10,6; SF_{tot} = 100% ; F_{dissipada} = 0%; A_{territorio} = 18,9%.

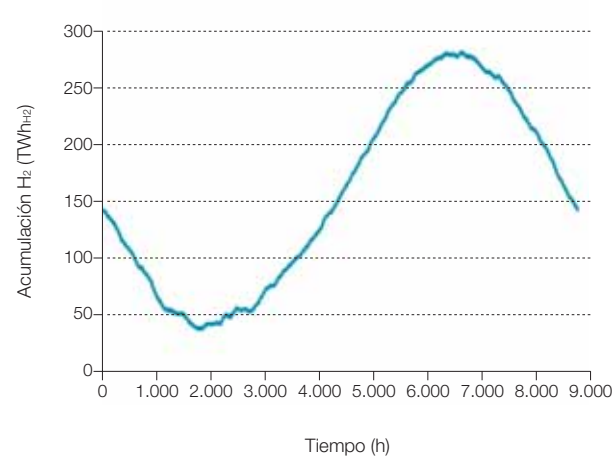
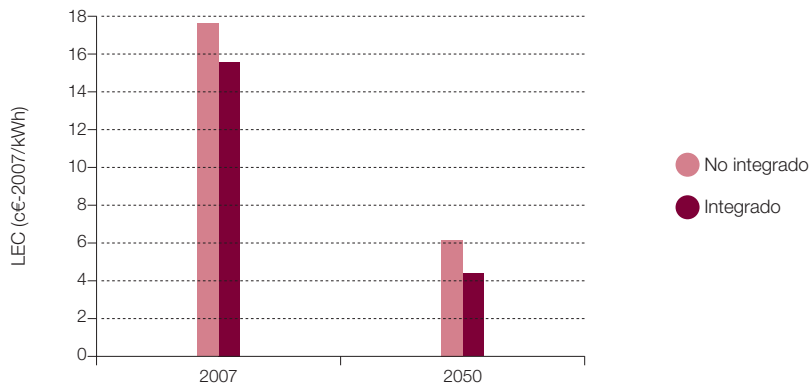


Figura 680. Comparativa de los costes normalizados de la producción de electricidad para el mix-3b (no integración del sistema energético) y el mix-4b2 (integración del sistema energético).



Para terminar con el análisis del mix-4b2 correspondiente a un sistema energético integrado, basado en energías renovables para la cobertura de la demanda BAU 2050, en la figura 680 recogemos la comparación de los costes normalizados de generación de electricidad entre el mix-3b (sistema energético no integrado) y el mix-4b2 (sistema energético integrado), donde podemos apreciar el beneficio de la integración energética asociado a evitar tener que disipar capacidad de generación de la potencia renovable instalada.

5.5.3 Coste total del sistema energético

En los apartados anteriores, junto al resultado de los procesos de análisis de la cobertura de la demanda, hemos presentado costes normalizados de la electricidad producida.

En este apartado nos vamos a centrar en evaluar los costes del total del sistema energético,

donde el coste de la electricidad producida es uno de los componentes, pero hay otros componentes como los combustibles fósiles adicionales a los empleados para generación de electricidad, la biomasa directa, los biocombustibles, la solar térmica, la capacidad de generación y de acumulación de hidrógeno y las emisiones, que contribuyen al coste total.

Los costes en los que estamos interesados son tanto los costes específicos por unidad de energía (LEC), como los costes absolutos. En efecto, desde el punto de vista de la evaluación de los efectos de las medidas de eficiencia e inteligencia que se incorporarán en el contexto E3.0, lo relevante es el coste anual absoluto asociado a la producción de energía, pues aunque el coste específico (LEC) resulte superior al desplegar eficiencia e inteligencia, es en el coste absoluto donde cabe esperar una reducción importante y, por tanto, donde se ven reflejadas las ventajas de estas medidas.

Al igual que en el apartado anterior, aquí nos limitaremos a proporcionar los costes para los extremos del periodo de tiempo considerado (años 2007 y 2050), en términos de dinero constante en el año 2007, y dejaremos para el siguiente apartado la presentación de los efectos de la evolución temporal de los costes, sobre los costes promedio en cada año y durante el periodo considerado.

A diferencia del apartado anterior, en el que los LEC se expresaron por unidad de energía producida (electricidad en barras de central), en este apartado vamos a referir los LEC a la energía final consumida.

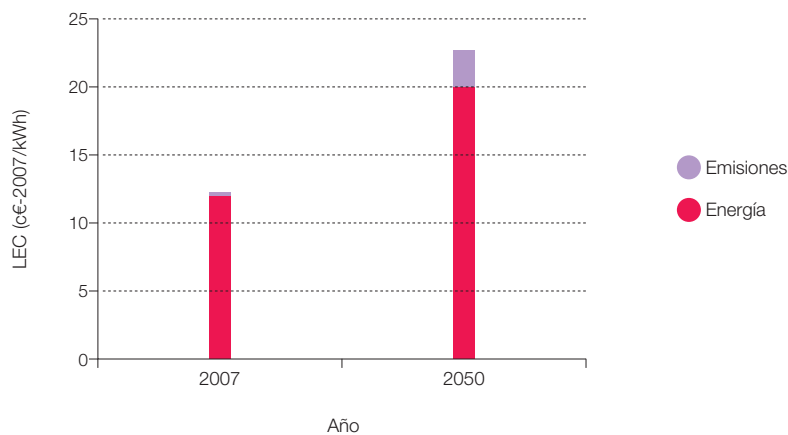
En la estructura de costes, vamos a diferenciar los costes correspondientes a la energía, y los asociados a las emisiones de CO₂. A su vez, diferenciaremos los costes correspondientes a la producción de electricidad, y los asociados al resto del consumo de energía final (principalmente dominados por los combustibles fósiles, pero con contribuciones de biomasa y solar térmica).

Las figuras 681 y 682 nos muestran la estructura de los costes específicos normalizados (LEC) para la producción de electricidad y para el resto del sistema energético, que abarca los combustibles fósiles, la biomasa y la solar térmica.

5.5.3.1 Generación BAU

En este punto recogemos los resultados relativos a la estructura de costes del contexto BAU con un sistema de generación BAU.

Figura 681. Estructura de los LEC para suministro de electricidad en el contexto de demanda BAU con generación BAU, y para los años 2007 y 2050. El LEC viene expresado en términos de energía final (en este caso electricidad).



El primer elemento que salta a la vista es el bajo peso de las emisiones^{1.011} en la estructura de costes para el año 2007: en estas condiciones es realmente difícil que la asignación de costes a las emisiones actúe como un *driver* del proceso de cambio del sistema energético. Para el año 2050, el coste específico de las emisiones es superior según el escenario adoptado, y además consideramos que no hay asignación de derechos de emisión y que todos los sectores deben pagar por sus emisiones.

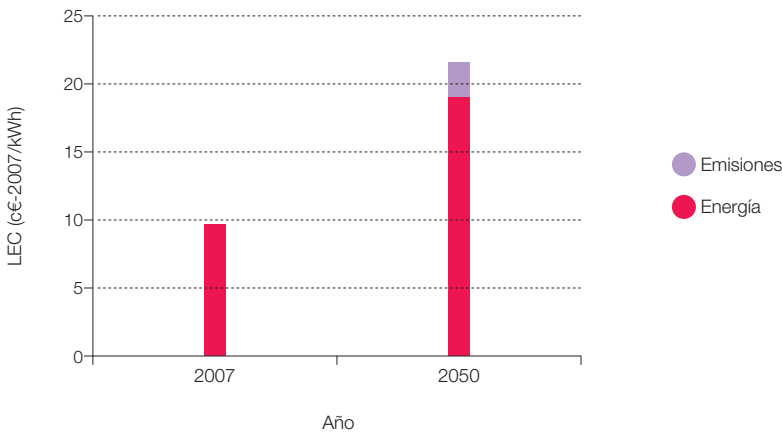
El segundo elemento relevante es el considerable incremento del coste específico en el año 2050 como consecuencia de la inflación incremental a la que se ven sometidos los combustibles fósiles que forman la base del suministro energético en este caso.

Por lo que respecta a la comparativa entre los costes específicos de la electricidad y del resto de componentes del sistema

energético, observamos cómo el coste de la electricidad es superior a la del resto de componentes energéticos, pero en el año 2050 la diferencia ya es pequeña, como consecuencia de la estabilización de los precios que tiene la contribución renovable en el sistema eléctrico, incluso con este sistema de generación BAU.

En las figuras anteriores mostrábamos el LEC asociado al suministro de electricidad y del resto de tipos de energía final. El denominador que definía estos LEC era el suministro final de la energía considerada. Pero el peso específico de la electricidad y del resto de energía sobre el suministro total de energía final total es bastante distinto, por lo que al analizar el LEC del conjunto del sistema energético^{1.012}, las contribuciones de la electricidad y del resto de tipos de energía final no serán homogéneas. En la figura 683 recogemos la estructura del LEC total del sistema energético para el contexto BAU.

Figura 682. Estructura de los LEC para suministro del resto de la energía aparte de la electricidad (principalmente combustibles fósiles, pero tienen contribuciones de biomasa y solar térmica) en el contexto de demanda BAU con generación BAU, y para los años 2007 y 2050. El LEC viene expresado en términos de energía final suministrada.



1.011 Esto es debido a que solo los sectores dentro del alcance de la directiva de comercio de emisiones se ven afectados, y dentro de estos, debido a la elevada asignación de derechos de emisiones en el año 2007, solo una pequeña cantidad de sus emisiones deben ser pagadas: para el sector de generación eléctrica, la asignación de derechos de emisiones fue del 82.3% de las emisiones, mientras que los sectores combustión e industrial tuvieron unas asignaciones superiores a sus emisiones. Además, el precio del CO₂ en el mercado durante el año 2007 era bajísimo. (Ministerio de Medioambiente, "Aplicación de la Ley 1/2005. Emisiones verificadas frente a asignaciones: año 2007", 2008).

1.012 En este caso, el denominador del LEC es el total del suministro de energía final.

Como podemos observar, en este contexto la electricidad es un componente secundario del coste total, dominando el resto de formas de energía final suministradas (principalmente los combustibles fósiles), motivo por el que la tendencia inflacionista de los combustibles fósiles repercute de forma muy

importante sobre el LEC total del sistema energético, de tal forma que para 2050 cabe esperar que el LEC total del sistema energético sea más del doble del que había en 2007 (a lo cual también contribuye el incremento de la contribución al coste total debida a las emisiones de CO₂).

Figura 683. Estructura de los LEC para suministro del total de energía final en el contexto de demanda BAU con generación BAU, y para los años 2007 y 2050. El LEC viene expresado en términos de energía final suministrada.

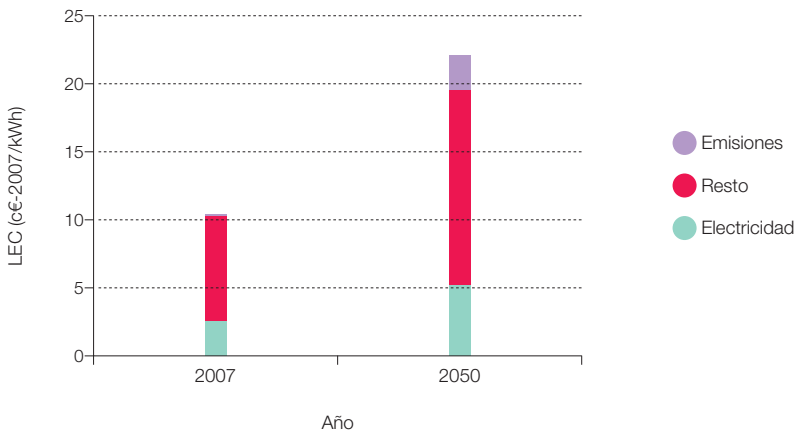


Figura 684. Estructura del coste total normalizado asociado al suministro de energía final en el contexto de demanda BAU con generación BAU, y para los años 2007 y 2050.

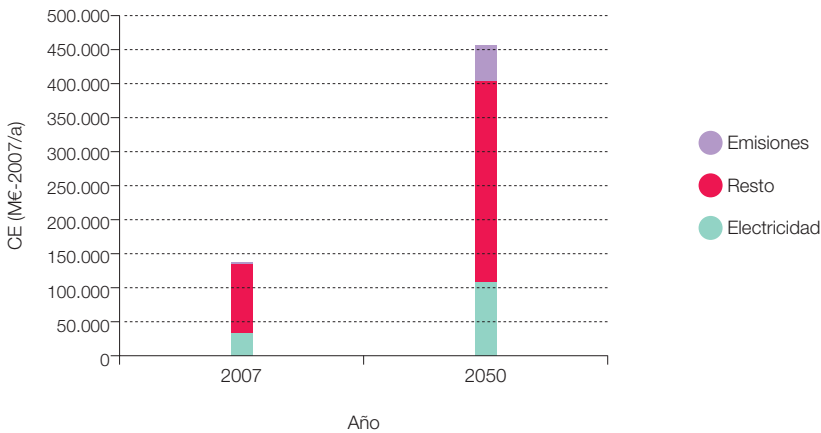


Figura 685. LEC del suministro de electricidad y del resto de tipos de energía final (principalmente combustibles fósiles, pero con contribuciones de biomasa y solar térmica), así como del conjunto del sistema energético, para el contexto BAU con generación BAU en el año 2007.

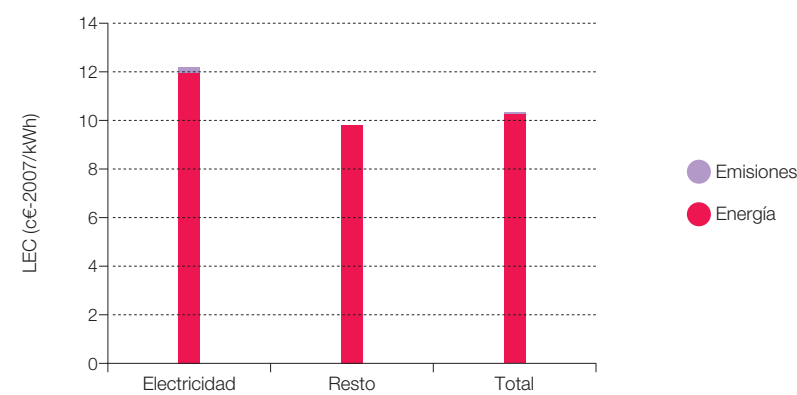


Figura 686. LEC del suministro de electricidad y del resto de tipos de energía final (principalmente combustibles fósiles, pero con contribuciones de biomasa y solar térmica), así como del conjunto del sistema energético, para el contexto BAU con generación BAU en el año 2050.



Figura 687. Coste total normalizado del suministro de electricidad y del resto de tipos de energía final (principalmente combustibles fósiles, pero con contribuciones de biomasa y solar térmica, para el contexto BAU con generación BAU en el año 2007).

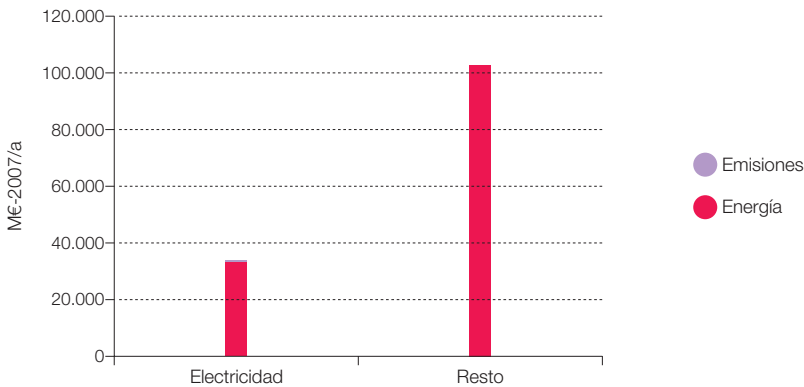
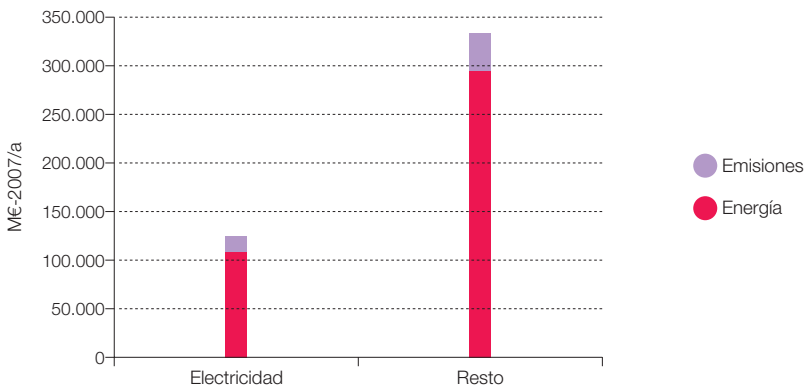


Figura 688. Coste total normalizado del suministro de electricidad y del resto de tipos de energía final (principalmente combustibles fósiles, pero con contribuciones de biomasa y solar térmica, para el contexto BAU con generación BAU en el año 2050).



Pero además del incremento en el coste específico de la energía, la demanda total de energía final también es mayor en 2050 que en 2007, por lo que el coste total del suministro de energía experimenta un incremento mayor que el del LEC. La figura 684 recoge la

estructura del coste total de energía normalizado. Como puede verse, los efectos combinados de la inflación de los combustibles y el incremento de la demanda conducirían a triplicar el coste total en el año 2050 respecto al del año 2007.

Las figuras 685 a 688 facilitan una comparación directa entre los costes específicos y totales asociados al suministro de electricidad y del resto de tipos de energía final (principalmente combustibles fósiles) en el contexto BAU con generación BAU, y en los años 2007 y 2050.

5.5.3.2 Generación renovable

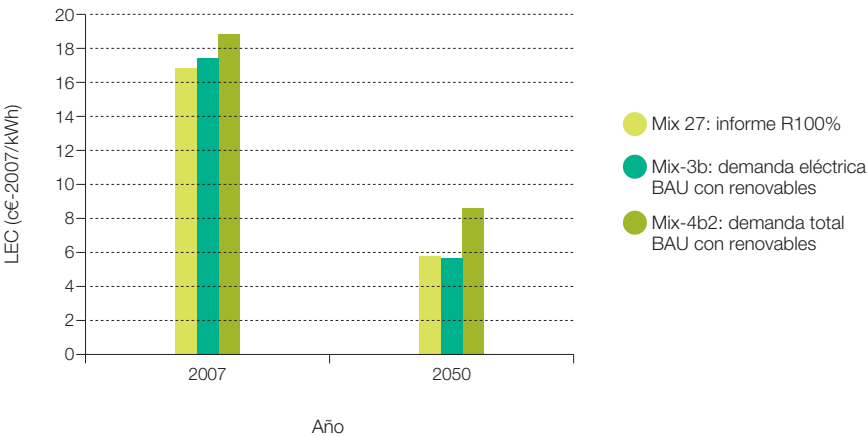
A modo de comparación de los resultados de costes en términos específicos por unidad de energía final, al considerar solo la electricidad o el conjunto del sistema energético, en la figura 689 presentamos los LEC correspondientes al caso de cobertura de la demanda BAU en 2050 con energías renovables. Como elemento de comparación presentamos el LEC del mix-27 asociado a la cobertura de la demanda eléctrica en el informe R100% (GP, 2007), pero aquí, expresado en términos de energía final. Los resultados del mix-27 y del mix-3b se refieren a costes específicos de la electricidad para dos mix dimensionados para

la cobertura de la demanda de energía eléctrica. El resultado correspondiente al mix-4b2 se refiere a coste específico promedio del conjunto de energía final asociado a la cobertura total de la demanda de energía en el BAU 2050.

Por lo que respecta a la comparativa entre los resultados del mix-27 y el mix-3b, podemos observar cómo en 2007 el mix-3b resulta ligeramente más caro por la mayor participación proporcional de la fotovoltaica, sin embargo, de cara al año 2050 en que los costes de esta tecnología ya se han reducido, el mix-3b presenta un LEC inferior como consecuencia del mayor factor de capacidad con el que opera (el mix-3b tiene SM = 2,2, frente al SM = 2,5 del mix-27).

La comparativa entre los resultados del mix-3b y el mix-4b2 nos permite apreciar el efecto del resto del sistema energético. A pesar de que el LEC correspondiente a la producción de electricidad es menor en el mix-4b2 que en el mix-3b gracias a la integración

Figura 689. Comparación de los LEC asociados a la generación eléctrica y a la cobertura total de la demanda para el caso de demanda BAU 2050 con generación renovable.



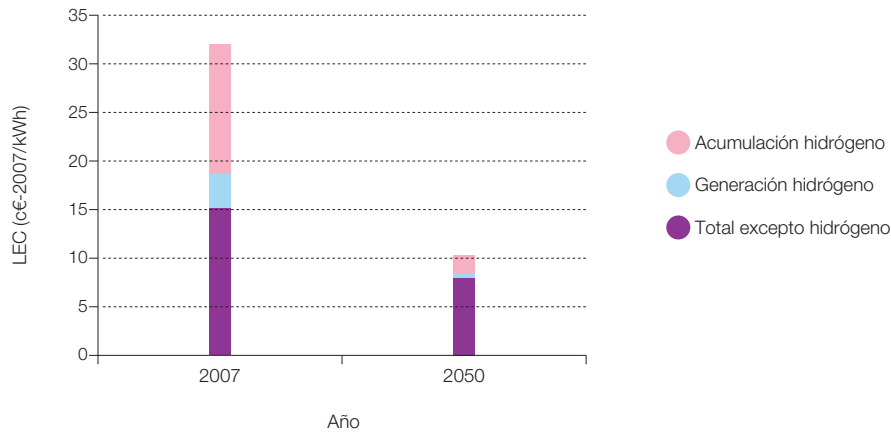
del sistema energético que permite aprovechar la potencia disipada por el sistema eléctrico, el LEC promedio del conjunto del sistema energético es mayor que el de producción de electricidad, consecuencia tanto de los elementos de coste adicionales (generación de hidrógeno, biomasa, solar térmica), como de las ineficiencias asociadas a la conversión de electricidad en hidrógeno.

Siguiendo con el caso de cobertura de la demanda BAU con energías renovables, las figuras 690 a 693 recogen la estructura de los LEC y el coste anual total en los años 2007 y 2050, y para los dos casos posibles en que se incorpore la hibridación termosolar, o no, para aumentar^{1.013} la seguridad de suministro en el sistema eléctrico.

En la estructura de costes hemos diferenciado el coste asociado a la acumulación y generación de hidrógeno. Por lo que respecta al coste de acumulación de hidrógeno, por lo general, los costes correspondientes a la acumulación

y gestión de otros combustibles no están incorporados en el resto de los casos, y por tanto, de cara a las comparaciones no resulta adecuado arrastrar estos costes. Sin embargo, dado que en el caso de inclinarse por un sistema energético que se apoyara en el hidrógeno como vector energético, sería preciso desarrollar esta estructura de acumulación como consecuencia del cambio, resulta interesante tener cuantificado el sobre coste asociado a este aspecto. El otro elemento diferenciado en la estructura de costes (total excepto hidrógeno), incluye todos los otros componentes de coste del sistema energético (generación eléctrica, combustibles, emisiones, etc.).

Figura 690. Coste específico (LEC) del conjunto del sistema energético con demanda BAU y cobertura 100% renovable para los años 2007 y 2050. El LEC se expresa por unidad de energía final. Aparece diferenciada la contribución de la acumulación y generación de hidrógeno. Caso sin incluir hibridación.



1.013 Como ya comentamos anteriormente, para este caso, el exceso de potencia eléctrica necesaria para cubrir la demanda de hidrógeno es tan elevada en términos relativos a la demanda eléctrica, que la hibridación termosolar resulta redundante.

Figura 691. Coste específico (LEC) del conjunto del sistema energético con demanda BAU y cobertura 100% renovable para los años 2007 y 2050. El LEC se expresa por unidad de energía final. Aparece diferenciada la contribución de la acumulación y generación de hidrógeno. Caso incluyendo hibridación termosolar para aumentar la seguridad de suministro del sistema eléctrico.

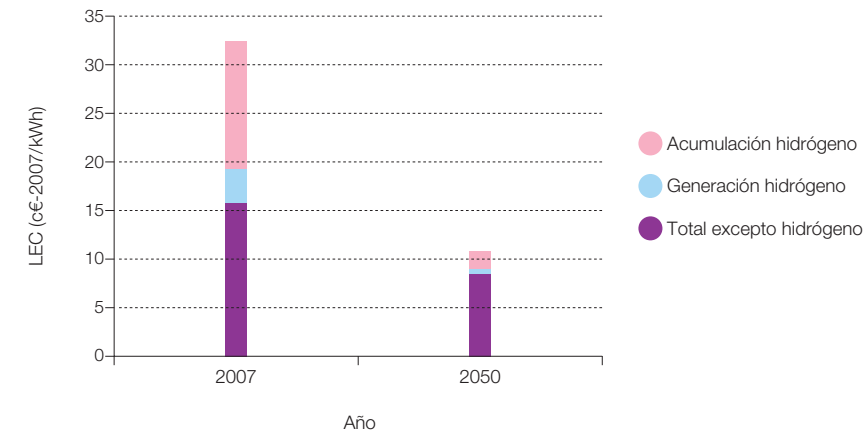


Figura 692. Coste total del conjunto del sistema energético con demanda BAU y cobertura 100% renovable para los años 2007 y 2050. Aparece diferenciada la contribución de la acumulación y generación de hidrógeno. Caso sin incluir hibridación termosolar.

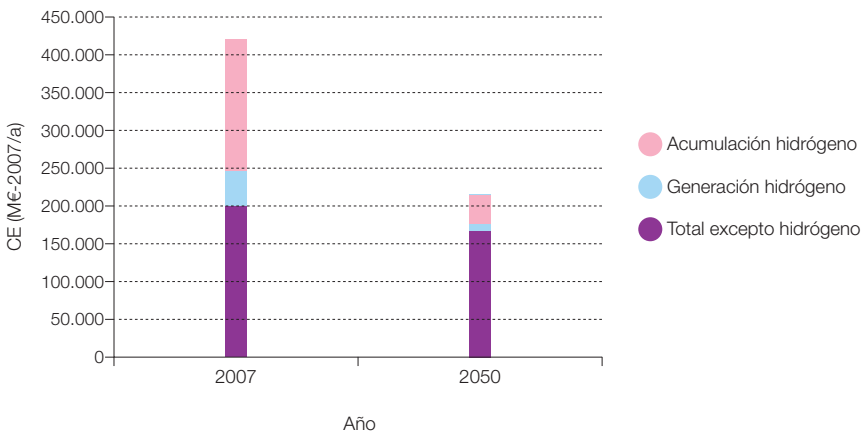
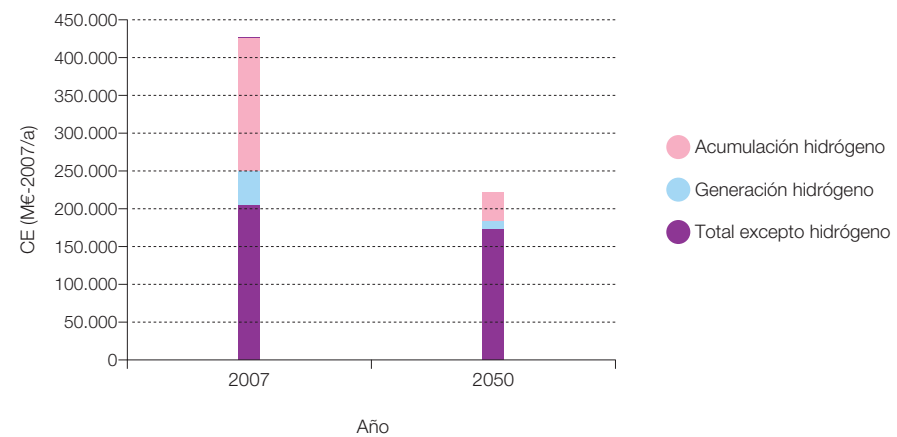


Figura 693. Coste total del conjunto del sistema energético con demanda BAU y cobertura 100% renovable para los años 2007 y 2050. Aparece diferenciada la contribución de la acumulación y generación de hidrógeno. Caso incluyendo hibridación termosolar para aumentar la seguridad de suministro del sistema eléctrico.



La primera conclusión que podemos extraer de estos resultados es la escasa diferencia entre los casos sin y con hibridación termosolar, motivo por el cual sería recomendable incluir la hibridación de cara a incrementar la seguridad del suministro del sistema eléctrico^{1.014}.

El motivo por el que la hibridación es tan poco relevante en este caso es que para el BAU, el peso relativo de la demanda de hidrógeno respecto a la demanda eléctrica directa es como 10 veces superior al que encontraremos en el contexto E3.0, por lo que la hibridación necesaria para regular el sistema eléctrico tiene un peso relativo muy inferior sobre la potencia total instalada, y por tanto su efecto se diluye^{1.015}.

La segunda conclusión que se puede extraer de estos resultados es el elevado peso relativo de la acumulación de hidrógeno sobre la estructura de costes del sistema energético, basado en energías renovables para el contexto BAU al inicio del desarrollo del escenario. Este

hecho es debido principalmente al elevado coste específico de la acumulación de hidrógeno al principio del escenario, y al elevado volumen de acumulación de hidrógeno requerido en el contexto BAU como consecuencia de la elevada demanda de hidrógeno. Hacia el final del escenario, en el año 2050, el peso relativo asociado a la acumulación de hidrógeno se reduce de forma muy significativa, como consecuencia, principalmente, de la reducción del coste específico de acumulación de hidrógeno, y por la mayor electrificación del sistema energético que reduce el peso específico del coste de la acumulación de hidrógeno sobre el coste total del sistema energético.

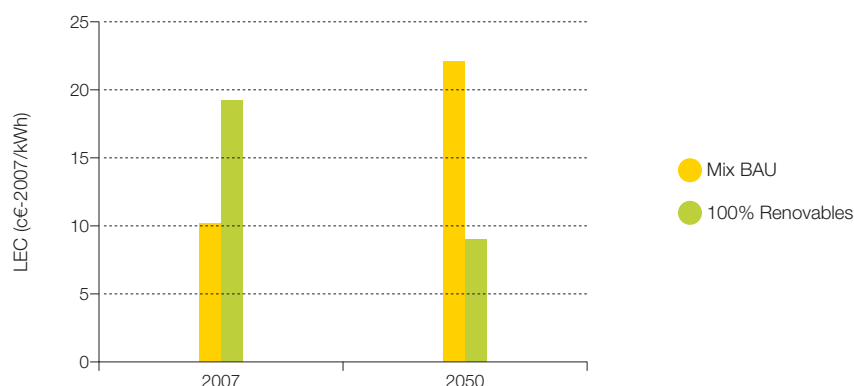
5.5.3.3 Comparativa generación BAU / generación renovable

En este punto procedemos a comparar los costes del contexto BAU al emplear una generación BAU o una generación 100% renovable.

1.014 Recordemos que en este caso la hibridación es redundante debido al gran sobredimensionado de la potencia de generación para poder proporcionar cobertura a la demanda de hidrógeno.

1.015 En efecto, para el contexto BAU la hibridación representa unos 50 GW sobre 1071 GW instalados, mientras que como veremos más adelante, para el contexto E3.0 la hibridación representa del orden de 40 GW sobre 183 GW instalados. Por tanto, en el contexto E3.0 las medidas de DSR (respuesta de la demanda) encaminadas a reducir los requerimientos de regulación del sistema eléctrico tendrán un peso específico muy superior sobre la estructura de costes.

Figura 694. Comparativa de los LEC del suministro de energía final total, en el contexto de demanda BAU, y con generación BAU y 100% renovable. El coste 100% renovable no incluye el coste asociado a la acumulación de hidrógeno, aunque sí a su generación.



Las figuras 694 y 695 recogen esta comparativa tanto en términos de LEC como de coste total. En estas figuras no se ha incluido, para el caso de suministro 100% renovable, el coste correspondiente a la acumulación de hidrógeno (aunque sí los correspondientes a la generación de hidrógeno). Esta comparativa consideramos que es la más adecuada porque para el caso de generación BAU tampoco se incluyen los costes asociados al almacenamiento de combustibles fósiles. Por otro lado, los costes del caso con generación 100% renovable incluyen los costes de la hibridación termosolar, que en este caso es redundante^{1.016} y contribuye tan solo a incrementar la seguridad de suministro en el sistema eléctrico. Por tanto, los costes correspondientes a la generación 100% renovable son conservadores.

En términos de coste específico (LEC), vemos como, si bien en el año 2007 la solución basada en energías renovables resulta considerablemente más cara que la del mix BAU, en el año 2050 las tendencias se invierten, y la solución 100% renovable permite estabilizar el coste de la energía en valores inferiores a

los del mix BAU en el año 2007. En valor medio en el periodo 2007-2050, la solución con generación 100% renovable también resulta más económica, pero lo más importante es que a partir del año 2050 la solución basada en generación 100% renovable presenta unos costes estables en el tiempo, mientras que la correspondiente al mix BAU seguirá inflacionándose. Por tanto, podemos concluir que incluso en el caso del contexto BAU de demanda, la solución basada en una generación 100% renovable resulta muy ventajosa desde una perspectiva económica^{1.017} respecto a la alternativa de mantener el mix BAU.

En este punto es preciso resaltar que el LEC del año 2007 para el caso de la generación 100% renovable se encuentra considerablemente afectado por la inversión asociada a la infraestructura de generación de hidrógeno que, al usarse con un factor de capacidad relativamente bajo, repercute de forma significativa sobre el LEC.

Pero si en términos de LEC la opción con generación 100% renovable ya resultaba ventajosa, en términos de coste total la ventaja de

1.016 Esto es así porque para el contexto BAU, debido a la gran demanda de hidrógeno, se requiere un gran sobredimensionado del parque generador respecto a la demanda de electricidad directa, lo cual trae como consecuencia que para la cobertura de la demanda eléctrica no sea precisa la capacidad de regulación que proporciona la hibridación termosolar.

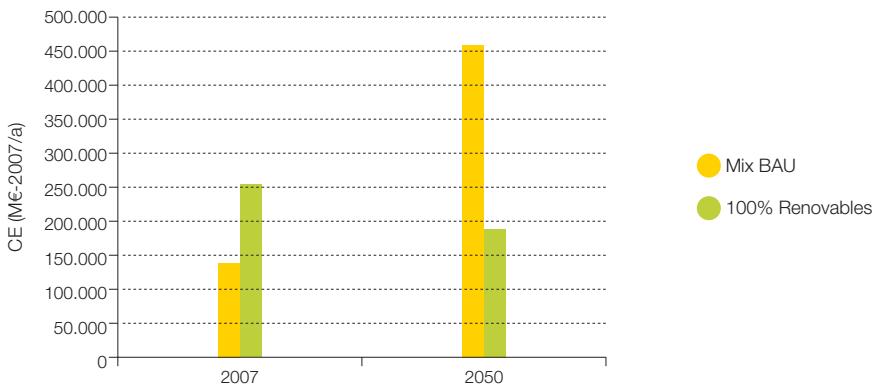
1.017 En este estudio estamos reflejando tan solo los costes de la energía suministrada, pero desde el punto de vista económico hay otra gran diferencia entre la generación con mix BAU y la generación 100% renovable: mientras que la generación con mix BAU lleva a que el grueso del gasto económico para cubrir la demanda de energía vaya a parar a las manos de una minoría de personas y organizaciones de otros países por la venta de los combustibles fósiles (sin que ni siquiera repercuta sobre la riqueza o bienestar de la mayoría de la población de esos países), en el caso de la generación 100% renovable, el gasto económico asociado a la cobertura de la demanda va directamente dirigido a articular la actividad económica asociada a la fabricación, instalación y operación de las instalaciones de generación renovable.

la opción 100% renovable se amplifica todavía más. En efecto, tal y como muestra la figura 695, el crecimiento de la demanda de energía final en el año 2050 respecto al año 2007, acentúa el efecto beneficioso de la estabilización de costes que nos proporciona la opción de generación 100% renovable, lo que aumenta mucho la diferencia entre los costes medios en el periodo considerado (2007-2050). En el año 2050, y a pesar del crecimiento de la demanda, la generación 100% renovable nos proporciona un coste total del abastecimiento energético inferior al del año 2007 con generación 100% renovable, y tan solo ligeramente superior al coste del año 2007 con mix BAU.

Si incluimos los costes correspondientes a la acumulación del hidrógeno, las figuras 696 y 697 nos muestran cómo la opción 100% renovable en el año 2007 se ve fuertemente penalizada, tanto a nivel de LEC como de coste total, aunque en el año 2050 la diferencia con el caso anterior es mucho más pequeña

como consecuencia de la reducción de los costes específicos de acumulación de hidrógeno. La conclusión principal de lo más favorable de la opción 100% renovable al largo plazo sigue siendo cierta, pero dada la necesidad de desplegar esta nueva infraestructura de acumulación de hidrógeno, estos resultados nos muestran claramente la conveniencia de limitar la participación del hidrógeno en la cobertura de la demanda durante los primeros años del periodo de tiempo considerado, hasta que se vaya reduciendo el coste de acumulación, lo cual también proporcionaría el beneficio de limitar los costes asociados a la generación de hidrógeno cuya contribución al LEC del sistema total es significativa. Las opciones para amortiguar este impacto económico asociado a la introducción del hidrógeno son, en primer lugar, el despliegue de medidas de eficiencia para limitar la demanda de energía final, y en segundo lugar, la sustitución parcial y temporal^{1.018} del hidrógeno mediante un mayor uso de biomasa en las etapas iniciales.

Figura 695. Comparativa de los costes normalizados totales asociados al suministro de energía final total, en el contexto de demanda BAU, y con generación BAU y 100% renovable. El coste 100% renovable no incluye el coste asociado a la acumulación de hidrógeno, aunque sí a su generación.



1.018 El recurso de biomasa disponible es, como ya hemos indicado anteriormente, limitado. Su uso temporalmente limitado para acotar el requerimiento de hidrógeno en sus etapas iniciales de recorrido de la curva de aprendizaje puede ser una opción viable, pero el mantener elevadas tasas de uso de biomasa de forma indefinida, aparte de no resultar sostenible, tampoco sería la opción económicamente más viable.

Figura 696. Comparativa de los LEC del suministro de energía final total, en el contexto de demanda BAU, y con generación BAU y 100% renovable. El coste 100% renovable incluye el coste asociado a la acumulación de hidrógeno.

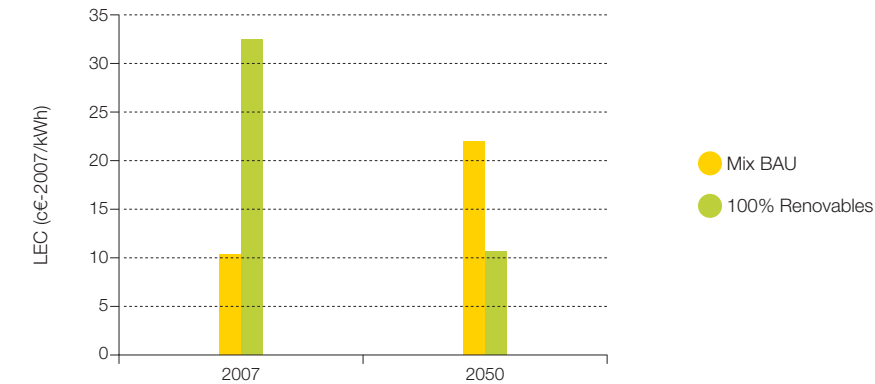
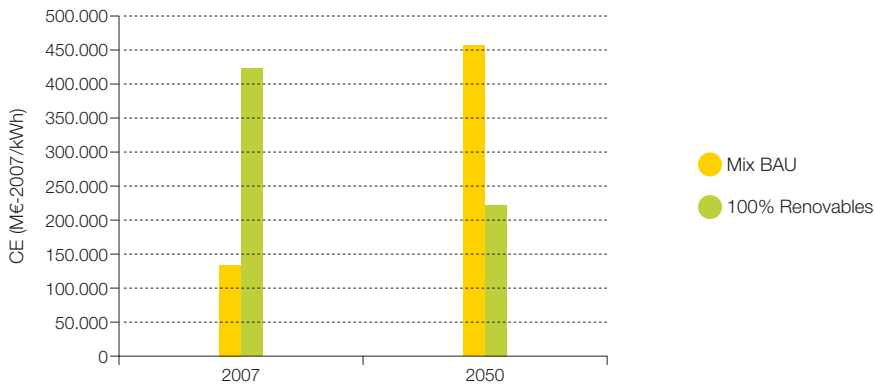


Figura 697. Comparativa de los costes normalizados totales asociados al suministro de energía final total, en el contexto de demanda BAU, y con generación BAU y 100% renovable. El coste 100% renovable incluye el coste asociado a la acumulación de hidrógeno.



5.5.4 Evolución temporal de costes

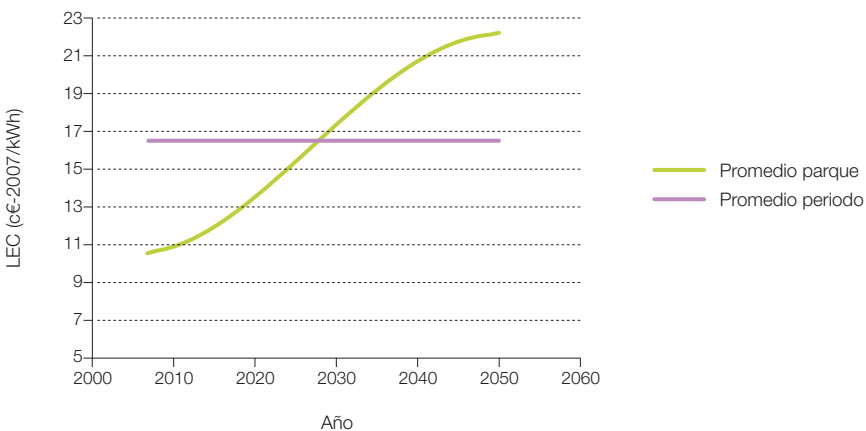
En los puntos anteriores hemos mostrado los costes (en términos específicos y totales) en los años extremos del periodo de tiempo considerado (años 2007 y 2050). El promedio aritmético de estos costes proporciona ya una primera valoración de los costes promedios asociados al periodo considerado. En el caso de los escenarios que plantean un cambio de modelo energético (bien sea por el lado de la generación o el de la demanda), este coste promedio es una valoración del coste asociado al cambio de modelo energético, si bien, en el caso de los sistemas basados en energías renovables, el coste al final del periodo (año 2050) es el que resulta indicativo de los costes del sistema energético, a partir del momento en el que se alcance el completo desarrollo tecnológico y comercial de las tecnologías empleadas; y es precisamente aquí, en su capacidad de contener la tenden-

cia inflacionista de los modelos energéticos BAU y de proporcionar una estabilidad de costes, donde los modelos basados en energías renovables ofrecen una de sus mayores contribuciones.

Sin embargo, tal y como indicamos anteriormente, en este estudio vamos a profundizar un poco más en la evolución de los costes a lo largo del periodo considerado, para proporcionar una mejor aproximación del coste promedio que la asociada a la media aritmética de los costes en los años extremos (2007 y 2050).

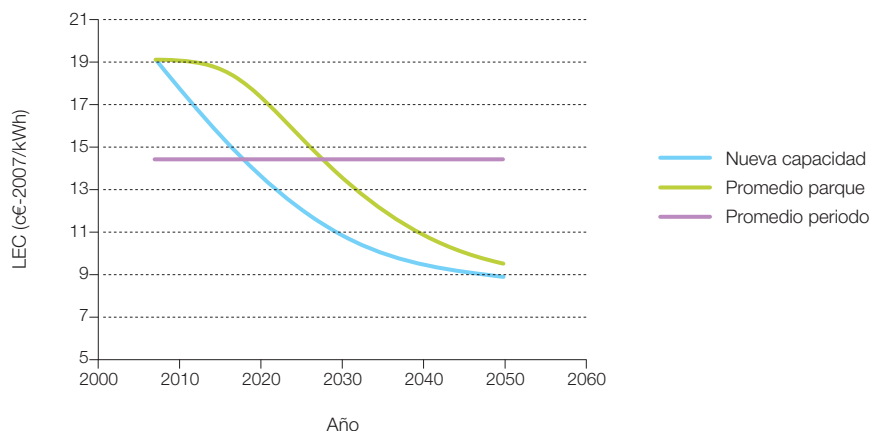
En las figuras 698 y 699 mostramos la evolución a lo largo del periodo considerado del LEC de la nueva capacidad instalada, el LEC promedio del parque existente en cada año^{1.019} (LEC_m), y el LEC promedio a lo largo del periodo considerado ($LEC_{promedio}$), para el contexto de demanda BAU y los dos casos analizados: mix BAU y mix 100% renovable.

Figura 698. Evolución del LEC promedio del parque generador, y valor promedio del LEC en el periodo de análisis, para el contexto BAU con mix de generación BAU. Para el caso del mix BAU, el promedio del parque generador existente en cada año (LEC_m) coincide con el LEC de la nueva capacidad instalada ese año.



1.019 Para el caso del mix BAU, tal y como expusimos anteriormente, al estar sus costes dominados por los costes de los combustibles, el LEC de la nueva capacidad instalada un año lo consideramos igual al LEC promedio del parque operativo en un año determinado (LEC_m).

Figura 699. Evolución del LEC promedio del parque generador, y valor promedio del LEC en el periodo de análisis, para el contexto BAU con mix de generación 100% renovable.



En estas figuras podemos apreciar la ventaja en términos de estabilización y reducción de costes futuros del sistema energético que nos proporciona la opción del mix 100% renovable frente al mix BAU.

Otra conclusión que podemos extraer de estos resultados es que el LEC promedio en el periodo considerado está muy próximo^{1.020} al promedio aritmético de los LEC al inicio y final del periodo, por tanto, la primera aproximación al coste medio empleada tanto en puntos anteriores de este informe como en el informe R100% (GP, 2007) proporciona una buena cuantificación de este parámetro.

En el caso del mix de generación 100% renovable, el promediado sobre el parque existente en un año determinado (LEC_m), produce un retraso en acceder a los costes decrecientes de las tecnologías a medida que van madurando, lo cual conduce a incrementar el $LEC_{promedio}$. La figura 700 nos muestra la evolución temporal de este desfase ($LEC_m - LEC$) a lo largo del periodo considerado, y muestra cómo el desfase crece

rápidamente al principio, alcanza un máximo en torno al año 2020 con un valor de 3,7 c€/2007/kWh, para posteriormente tender asintóticamente a cero. En el año 2050 el desfase es ya tan solo de 0,6 c€/2007/kWh.

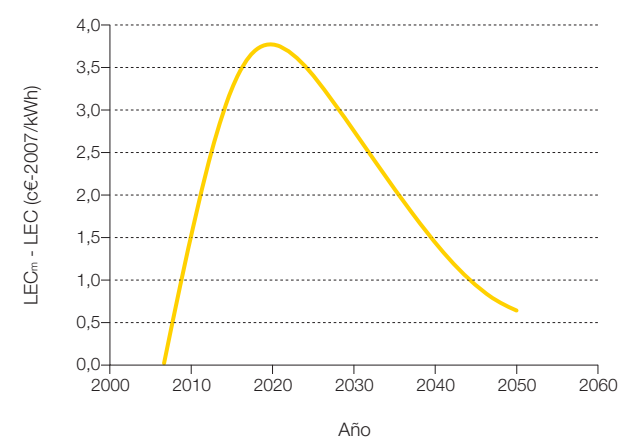
Por lo que respecta a los valores promedio del LEC en todo el periodo considerado, en la figura 701 presentamos una comparación directa. Como podemos ver, incluso en términos promedio el mix 100% renovable proporciona un coste menor que el mix BAU. Por tanto, producir el cambio del modelo del sistema de generación desde el mix BAU a un mix 100% renovable, no solo nos da acceso a unos costes del suministro de energía estables y muy inferiores en el futuro, sino que además, en el periodo de implantación del nuevo sistema de generación, nos sale más barato. Es decir, la transición del sistema de generación más allá de resultar gratis, nos proporciona un ahorro neto en el periodo de desarrollo^{1.021}. A esto hay que añadir todos los efectos positivos asociados a la incentivación del sistema económico^{1.022} que proporciona un sistema de generación basado en renovables,

1.020 Para el mix BAU, el promedio aritmético es de 16,2 c€/2007/kWh, mientras que el promedio resulta de 16,3 c€/2007/kWh. Para el mix 100% renovable, el promedio aritmético es de 14,0 c€/2007/kWh, mientras que el promedio resulta ser de 14,4 c€/2007/kWh.

1.021 De hecho, esta conclusión seguiría siendo válida incluso si el $LEC_{promedio}$ del sistema 100% renovable en el periodo 2007-2050 resultara superior al del mix BAU en este periodo: dada la estabilización de costes que proporciona el mix 100% renovable y su coste muy por debajo del correspondiente al mix BAU a partir del año 2050, bastaría prolongar ligeramente el periodo de promediado para obtener un $LEC_{promedio}$ del sistema 100% renovable inferior al del mix BAU.

1.022 Generación de empleo, actividad industrial y de servicios, etc.

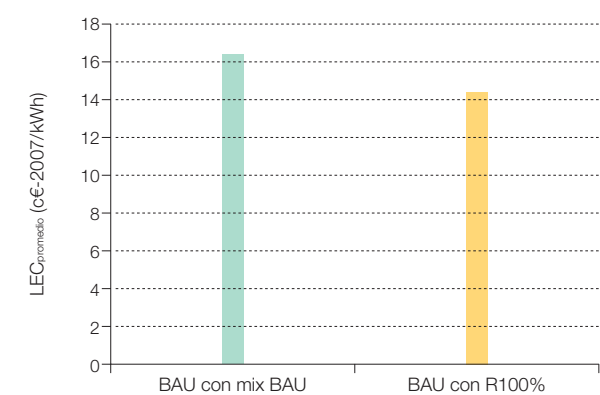
Figura 700. Evolución temporal en el periodo considerado, y para el contexto BAU con mix de generación 100% renovable, del desfase entre el coste específico medio del parque operativo en un año determinado y el coste específico de la nueva capacidad instalada durante ese año.



en contraposición a desperdiciar esos recursos económicos para comprar un recurso externo (combustibles fósiles) que beneficia a una pequeña minoría fuera de nuestro país, sin incentivar nuestro sistema económico, e incluso sin proporcionar beneficios para el

grueso de la población de origen de los países a los que compramos esos recursos fósiles. Además, al emprender esa transición del sistema energético hace que colaboremos en el avance de estas tecnologías a lo largo de su curva de aprendizaje, haciéndolas

Figura 701. Comparación de los LEC promedio durante el periodo de tiempo considerado (2007-2050) para el contexto BAU y las dos opciones de generación: mix BAU y 100% renovables.



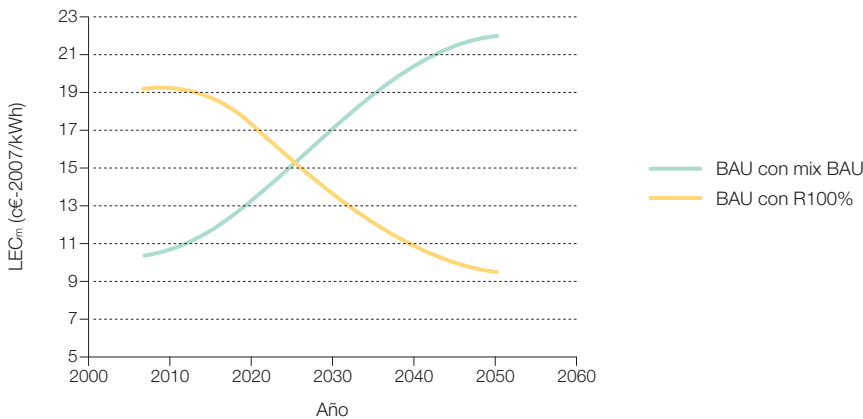
más accesibles al resto^{1.023} de países, y por tanto haciendo posible la estabilización del sistema climático. Y a partir del año 2050 hacia adelante, haber acometido este proceso de reconversión del mix BAU hacia el sistema 100% renovable, nos deja en una situación con unos costes estables de la energía final suministrada del orden de 8,9 c€/2007/kWh, frente al escenario al que nos conduciría seguir con el mix BAU con unos costes en 2050 de 22,0 c€/2007/kWh sobre los que todavía cabría esperar una inflación adicional en los años futuros, a medida que fuera aumentando la escasez de los recursos en los que se basaría nuestro sistema energético^{1.024}.

La figura 702 recoge la comparativa directa entre los LEC promedio del parque de generación existente en cada año (LEC_m) para el contexto de demanda BAU, y los dos casos de mix BAU y mix 100% renovable. Como podemos observar, en torno al año 2025 ya alcanzaríamos una paridad de costes, y a partir de este instante la opción del mix 100% renovable nos proporcionaría unos ahorros

rápidamente crecientes que se prolongarían indefinidamente más allá del año 2050.

Si cruzamos estos resultados con los del escenario de evolución temporal de la demanda BAU anteriormente presentado, obtenemos una estimación de la evolución de los costes totales del sistema energético a lo largo del periodo considerado. En la figura 703 reproducimos estos resultados, en los que se ha empleado el LEC promedio del parque generador en cada año (LEC_m) para caracterizar los costes específicos de ese año, y el escenario de evolución temporal de la demanda BAU anteriormente desarrollado. Como podemos observar, para el mix de generación 100% renovable se alcanza un máximo del coste total en torno al año 2022, consecuencia de la tendencia creciente de la demanda y la decreciente de los costes específicos, unos pocos años antes de alcanzar la paridad de costes con el mix BAU (año 2025). Sin embargo, este máximo interior del mix 100% renovable es muy inferior al valor del coste total para el mix BAU en el año 2050.

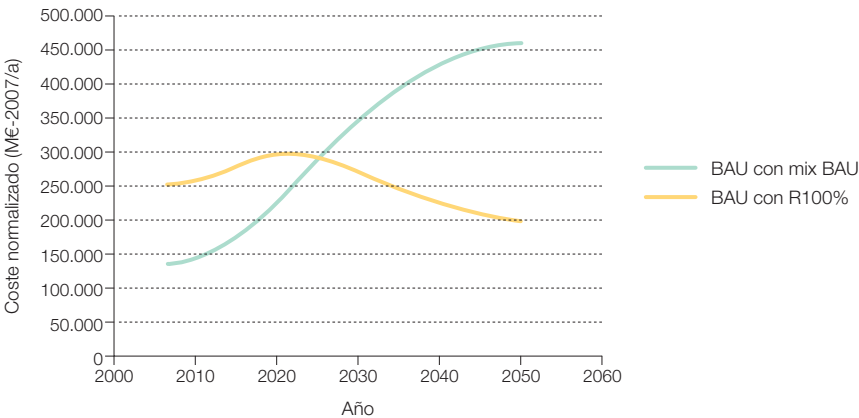
Figura 702. Comparación de la evolución del LEC correspondiente al promedio del parque de generación existente en cada año para el contexto BAU y las dos opciones de generación: mix BAU y 100% renovables.



1.023 Especialmente a aquellos con economías con menos recursos y pendientes, o en proceso de activar su desarrollo económico.

1.024 De hecho, empleando un periodo de promediado mucho más largo del considerado en este estudio (con el punto final más allá del año 2050), la diferencia entre los $LEC_{promedio}$ del sistema energético sería, como mínimo, la correspondiente a esta diferencia de costes existentes en el año 2050 (22,0 c€/2007/kWh para el mix BAU y 8,9 c€/2007/kWh para el 100% renovable), la cual probablemente se incrementaría por la inflación creciente del mix BAU más allá del año 2050.

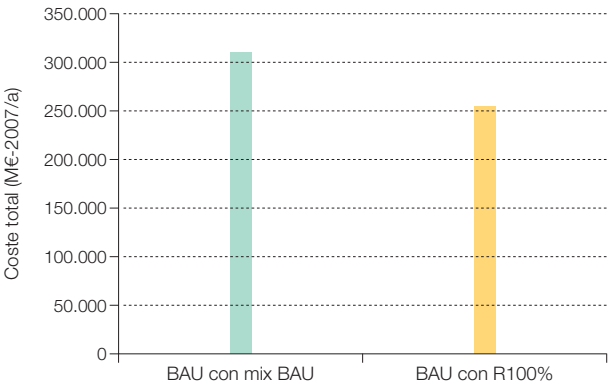
Figura 703. Evolución de los costes totales normalizados del sistema energético para el contexto de demanda BAU y los dos casos de mix BAU y mix 100% renovable. Los costes anuales se han obtenido como producto del LEC_m de cada año por el escenario de demanda en ese año.



En términos del coste anual promedio en el periodo de tiempo considerado (2007-2050), la figura 704 nos recoge la comparativa entre los mix BAU y mix 100% renovable, y mues-

tra el ahorro proporcionado por la opción del mix 100% renovable frente al mix BAU, que asciende en valor promedio^{1.025} a 55.556 M€-2007/a.

Figura 704. Coste anual total normalizado promedio en el periodo 2007-2050 para el contexto de demanda BAU y las dos opciones de generación caracterizadas por el mix BAU y el mix 100% renovable.



1.025 Resulta útil comparar este valor con el del coste de las primas a las energías renovables en el año 2009: el coste de las primas fue un 8% de este ahorro anual promedio. Pero así como el ahorro, por ser promedio, aplica para cada uno de los años del periodo 2007-2050, las primas, como mecanismo de apoyo al avance por la curva de aprendizaje, estos no constituyen un gasto fijo en todo este periodo, sino que se van reduciendo gradualmente hasta desaparecer eventualmente. Por tanto, el peso relativo de las primas sobre el ahorro proporcionado constituye un porcentaje muy inferior a este 8%. Por otro lado, el ahorro anual promedio está normalizado. Si normalizamos las primas y suponemos que se aplican durante 20 años (promedio del RD 661 para las distintas tecnologías), el coste total de las primas sería un 4,8% del ahorro en el periodo 2007-2050, porcentaje que iría decreciendo al aumentar el periodo de tiempo considerado.

5.6 Cobertura de demanda E3.0

En este punto vamos a recoger los resultados del análisis de la cobertura de la demanda para el contexto E3.0.

Hemos considerado dos casuísticas para el análisis de la cobertura de la demanda en el contexto E3.0:

- Cobertura de la demanda desde el lado de la oferta.

Correspondería a una operación más BAU del sistema energético, en el que la participación de la demanda en la operación del sistema sería nula más allá del despliegue de eficiencia que caracteriza al contexto E3.0. Por tanto, en este caso no tendríamos una contribución significativa de la gestión de la demanda. Los elementos de flexibilidad, en este caso, se verían limitados a aquellos que se pueden ofrecer desde el lado de la oferta: regulación por capacidad de acumulación de centrales termosolares, regulación de las hidráulicas con capacidad de acumulación, biomasa, hibridación termosolar con biomasa, bombeo hidroeléctrico, acumulación de hidrógeno, etc.

- Cobertura con gestión de la demanda.

En este caso, se articularía la participación de la demanda para que constituyera una contribución significativa en la operación del sistema energético. Para esta casuística, los elementos de flexibilidad del sistema energético incorporarían, además de los disponibles por el lado de la oferta en el caso anterior, todos aquellos elementos que proporcionan la gestión y respuesta de la demanda: gestión de la demanda en el sector edificación y en el industrial, interacción bidireccional de los vehículos eléctricos con la red (V2G), etc.

5.6.1 Cobertura desde el lado de la oferta

En este caso, la cobertura de la demanda del contexto E3.0 se aborda con un sistema energético operado desde el lado de la oferta, sin involucrar a la demanda^{1.026} más allá del despliegue de eficiencia que caracteriza a este contexto.

La regulación de este sistema energético contraría, por un lado, con la capacidad de regulación a la baja de toda la potencia no gestionable instalada en el sistema. Esta regulación, en un sistema energético no integrado, conduce a una disipación de la capacidad de generación y, por tanto, a un encarecimiento del coste de la energía. Por eso, el planteamiento que se va a adoptar es el de un sistema energético integrado, donde el excedente de capacidad de generación del sistema eléctrico se emplea como generación para la producción del hidrógeno necesario para cubrir aquellos componentes de consumo de energía final, que no pueden cubrirse con electricidad y que no se encuentran cubiertos con biomasa o solar térmica.

Adicionalmente a esta capacidad de regulación de la potencia renovable no gestionable, el sistema de generación cuenta en este caso con mecanismos de flexibilidad por el lado de la oferta, como son las capacidades de acumulación y potencias ofrecidas por la termosolar^{1.027}, la capacidad de acumulación de la hidroeléctrica regulada, la hibridación termosolar directa, las centrales de biomasa^{1.028}, y la potencia geotérmica^{1.029}. Las figuras 705 y 706 recogen la estructura de la capacidad de acumulación y potencia de regulación aportada al sistema por estos mecanismos de flexibilidad por el lado de la oferta para el caso de cobertura de la demanda que posteriormente presentaremos.

1.026 Debe recordarse sin embargo, que para este caso la recarga de los EVs se realiza en horario nocturno, en una estrategia orientada a regularizar la curva de la demanda eléctrica BAU. Esto constituye también una cierta gestión de la demanda, aunque estática, en el sentido de que no responde a las necesidades reales del sistema eléctrico considerado (contexto E3.0), sino del establecido en el contexto BAU. El caso de una recarga totalmente aleatoria de los EVs no se ha analizado en este estudio.

1.027 Conviene recordar que los diseños de centrales termosolares incluidos en el mix de generación considerado incorporan una capacidad de almacenamiento térmico de 15 horas.

1.028 Conviene recordar que las centrales de biomasa incluidas en el mix de generación son centrales cogenerativas que operan con gas de síntesis con ciclos de turbina de gas regenerativos, con bajas presiones de entrada en turbina, y por tanto con una elevada capacidad de respuesta para ajustarse a los requerimientos de regulación del sistema eléctrico.

1.029 Sin embargo, por lo que respecta a la geotérmica, dadas las relativamente bajas potencias que hemos incluido en los mix analizados, y dada la elevada disponibilidad de mecanismos de regulación, no hemos empleado la capacidad de regulación de la potencia geotérmica instalada. Debe tenerse en cuenta que además, el caso de la geotérmica es más parecido al de una central hidroeléctrica fluyente, en la que no hay opción de acumular la capacidad de generación no empleada al regular, por lo que se reducen los ingresos asociados a la generación sin la contraprestación de un ahorro adicional por no usar el recurso energético empleado. Por este motivo, desde un punto de vista económico, también resulta más adecuado el uso de otros recursos de regulación.

Figura 705. Capacidad de acumulación a disposición del sistema eléctrico para el caso sin GDE.

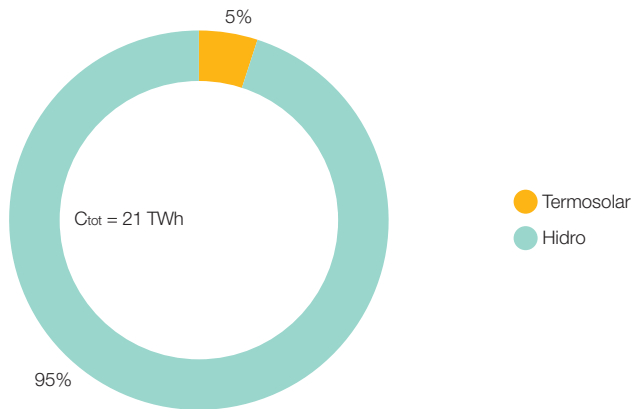
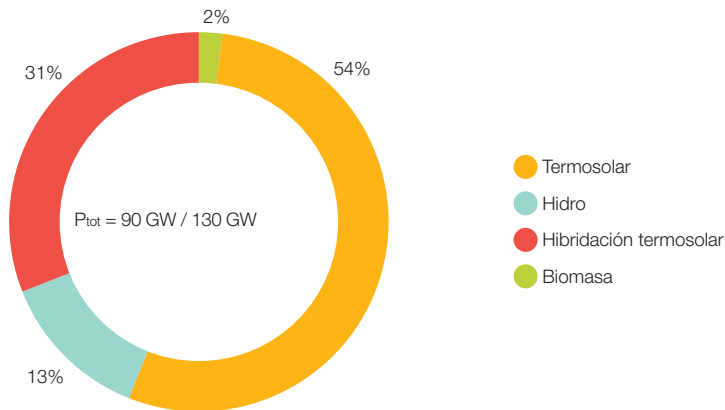


Figura 706. Potencia de regulación gestionable a disposición del sistema eléctrico para el caso sin GDE. La potencia total asciende a 130 GW, pero dentro de estos hay 40 GW de hibridación termosolar que comparten el bloque de potencia con la termosolar.



De estas figuras conviene resaltar un par de aspectos:

- Por lo que se refiere a la potencia de regulación se indican dos números. La potencia de regulación instalada son 90 GW, pero de estos hay 40 GW de las centrales termosolares que pueden operar de forma híbrida, y proporcionan una potencia de regulación efectiva^{1.030} de

130 GW. La potencia de termosolar híbrida implementada es del orden de la mitad del total de la potencia termosolar, de tal forma que la otra mitad de la potencia termosolar instalada proporciona una reserva de flexibilidad del sistema de generación^{1.031}.

- Para la operación del sistema en el análisis de cobertura de la demanda que hemos

1.030 El motivo para diferenciar explícitamente estos 40 GW de termosolar híbrida, es que proporcionan un modo de regulación adicional al que ofrecen las termosolares (merced a su capacidad de acumulación térmica), que además entra en operación cuando no hay disponibilidad de recurso solar (directo o procedente de la acumulación térmica).

1.031 Esta reserva de flexibilidad, es decir, la hibridación con biomasa del resto de las centrales termosolares, se podría implementar en el caso de que se considerara conveniente incrementar la garantía de cobertura de la demanda para responder a contingencias, más allá de las recogidas en los años meteorológicos tipo (a nivel provincial) empleados para simular la capacidad de generación de la potencia renovable instalada.

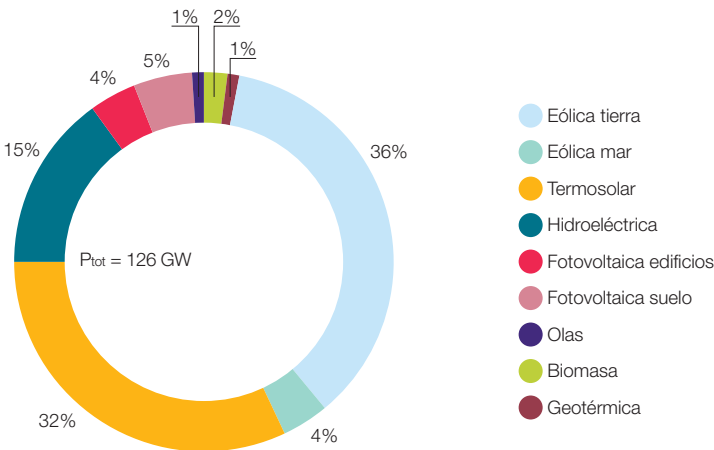
desarrollado, no se requiere la participación del bombeo hidroeléctrico. Puesto que actualmente ya contamos con una capacidad de bombeo hidroeléctrico que proporciona 1,5 TWh / 3,7 GW de capacidad de regulación, este componente puede entenderse como un elemento adicional de seguridad de suministro, que estaría listo para incorporarse a la operación del sistema si se requirieran servicios de regulación adicionales. El inconveniente del bombeo hidroeléctrico frente a los otros mecanismos de regulación disponibles desde el lado de la oferta es que lleva asociadas unas pérdidas energéticas^{1.032} superiores a los otros elementos de flexibilidad.

En este punto, conviene recordar la conclusión obtenida en el informe R100% (GP, 2007) por lo que respecta a los requerimientos de regulación de los sistemas de generación eléctrica basados en energías renovables: los requerimientos de regulación principales son

en términos de potencia, y no de capacidad de acumulación. Por tanto, la elevada potencia de regulación disponible, así como la importante reserva de potencia de regulación a la que se podría acceder, constituyen una elevada garantía de suministro.

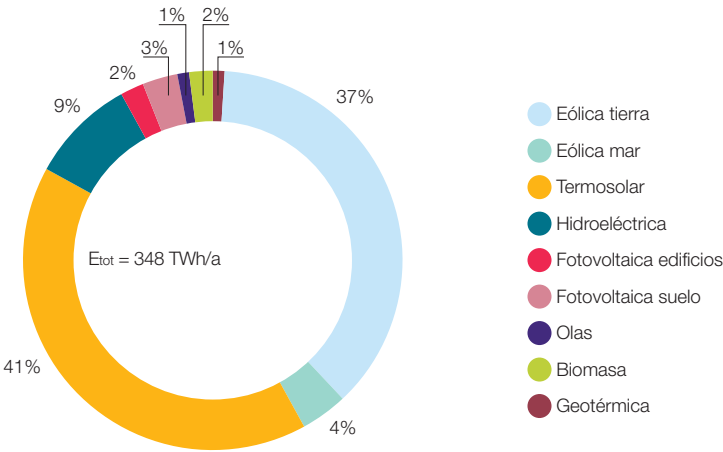
El primer caso para el que vamos a presentar resultados de análisis de cobertura de la demanda en el contexto E3.0, es el caso-3b2. Se trata de un caso elaborado para obtener una comparación directa con el caso-3b del contexto de demanda BAU con cobertura 100% renovable. Por tanto, se trata de un caso dimensionado para alcanzar una cobertura de la demanda de electricidad directa análoga a la del caso-3b, es decir, una $SF_{el\acute{e}c} = 97,2\%$, y dotado con una capacidad de acumulación del sistema eléctrico análoga a la del caso-3b, es decir, $C = 3$ TWh. Las figuras 707 y 708 presentan la estructura de la potencia instalada y de la generación para el mix-3b2.

Figura 707. Distribución de la potencia instalada en el caso-3b2 dimensionado para cubrir la demanda de electricidad directa (incluye EVs) del contexto E3.0 en el año 2050. $SM = 1,55$; $SF_{el\acute{e}c} = 97,2\%$; $SF_{tot} = 57,6\%$; $F_{disipada} = 15,3\%$; $C = 3$ TWh; $CF_{global} = 31,5\%$; $A_{territorio} = 3,3\%$.



1.032 El rendimiento global del bombeo hidroeléctrico (debido a los rendimientos de instalaciones de bombeo y turbinación) es del orden del 70%, por lo que se pierde un 30% de la electricidad generada.

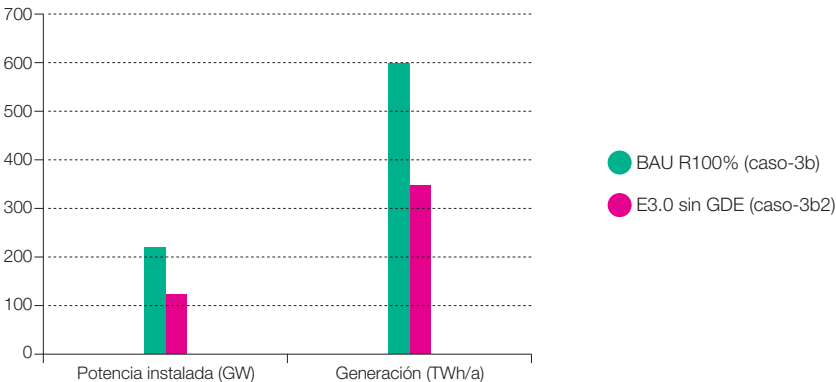
Figura 708. Estructura de la generación en el caso-3b2 dimensionado para cubrir la demanda de electricidad directa (incluye EVs) del contexto E3.0 en el año 2050. SM = 1,55; SF_{eléctrica} = 97,2%; SF_{tot} = 57,6%; F_{dissipada} =15,3%; C = 3 TWh; CF_{global} = 31,5%; A_{territorio} = 3,3%.



En la figura 709 encontramos la comparación entre las potencias instaladas y generación eléctrica de los mix de generación asociados a los caso-3b (demanda BAU con 100% renovables) y caso-3b2 (demanda E3.0 sin gestión de la demanda). Esta figura ya nos

empieza a mostrar los beneficios del despliegue de eficiencia: para una misma SF_{eléctrica}, el requerimiento de potencia instalada en el contexto E3.0 es prácticamente la mitad (el 57%) de la necesaria en el contexto BAU, y eso a pesar del hecho de que ahora, para el

Figura 709. Comparación de la potencia instalada y generación eléctrica de los mix asociados al caso-3b (demanda BAU en el año 2050 con generación 100% renovable) y caso-3b2 (demanda E3.0 en el año 2050 sin gestión de la demanda).



contexto E3.0, la demanda eléctrica directa incluye la gran mayoría de la demanda de energía del sector transporte, mientras que en el contexto BAU la cobertura de la demanda del subsector transporte a través de electricidad era prácticamente nula.

La figura 710 muestra una comparativa de las prestaciones adimensionales de los mix de generación asociados a los caso-3b (demanda BAU con 100% renovables) y caso-3b2 (demanda E3.0 sin gestión de la demanda). Ambos tienen la misma $SF_{eléctrica}$,

Figura 710. Comparación de prestaciones adimensionales de los mix asociados al caso-3b (demanda BAU en el año 2050 con generación 100% renovable) y caso-3b2 (demanda E3.0 en el año 2050 sin gestión de la demanda).

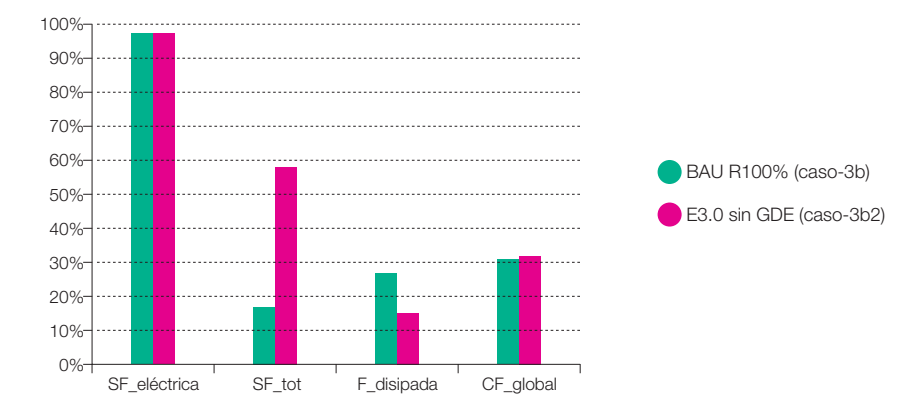
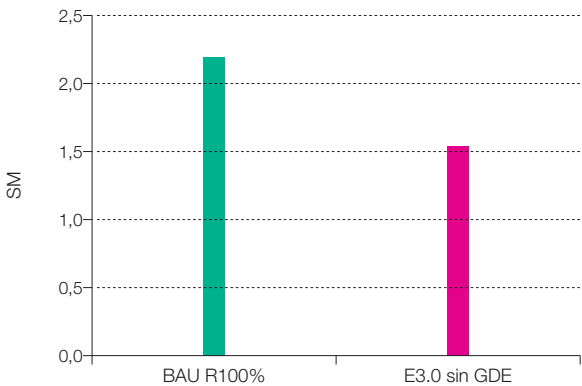


Figura 711. Comparación de los múltiplos solares de los mix asociados al caso-3b (demanda BAU en el año 2050 con generación 100% renovable) y caso-3b2 (demanda E3.0 en el año 2050 sin gestión de la demanda).



pues ese fue el criterio de dimensionado elegido para la comparativa, sin embargo, la SF_{tot} para el caso-3b2 es 3,5 veces superior a la del caso-3b, debido a que en el caso-3b2, la mayoría de la demanda del sector transporte se encuentra electrificada y por tanto entra dentro de la demanda de electricidad directa. La fracción de energía disipada en el caso-3b2 es considerablemente inferior (un 57,3%) de la asociada al caso-3b, lo que indica un mejor aprovechamiento de la potencia renovable instalada para la cobertura de la demanda eléctrica en el contexto E3.0, incluso sin participación de la gestión de la demanda. Este hecho se ve confirmado por el múltiplo solar considerablemente inferior que hace falta en el caso-3b2 para alcanzar la misma $SF_{eléctrica}$, tal y como muestra la figura 711.

La figura 712 presenta los resultados del análisis de cobertura de la demanda para el caso-3b2, mientras que la figura 713 nos muestra la evolución del estado de carga de

la acumulación del sistema eléctrico en este caso. Como podemos observar, las situaciones de déficit de cobertura de la demanda se encuentran muy localizadas al principio y final del año, y serían por tanto fácilmente resolubles introduciendo hibridación con biomasa de las centrales termosolares, lo cual requeriría un consumo relativamente bajo de biomasa. Por lo que respecta a la biomasa directa, la limitación de los mecanismos de flexibilidad en este caso la obliga a trabajar con un factor de capacidad relativamente elevado en comparación con otros casos, lo que conduce a un consumo de biomasa del orden de 21 TWh/a. Por lo que respecta a la disipación, vemos que se encuentra muy localizada en la parte central del año, y no es capaz de proporcionar una cobertura de la demanda de electricidad para la generación de hidrógeno necesaria para completar la cobertura de la demanda de energía final del contexto E3.0, motivo por el que será preciso incrementar la potencia instalada. Esta

Figura 712. Análisis de la cobertura de la demanda con el mix-3b2 dimensionado para cubrir la demanda de electricidad directa (incluye EVs) del contexto E3.0 en el año 2050. $SM = 1,55$; $SF_{eléctrica} = 97,2\%$; $SF_{tot} = 57,6\%$; $F_{disipada} = 15,3\%$; $C = 3$ TWh; $CF_{global} = 31,5\%$; $A_{territorio} = 3,3\%$.

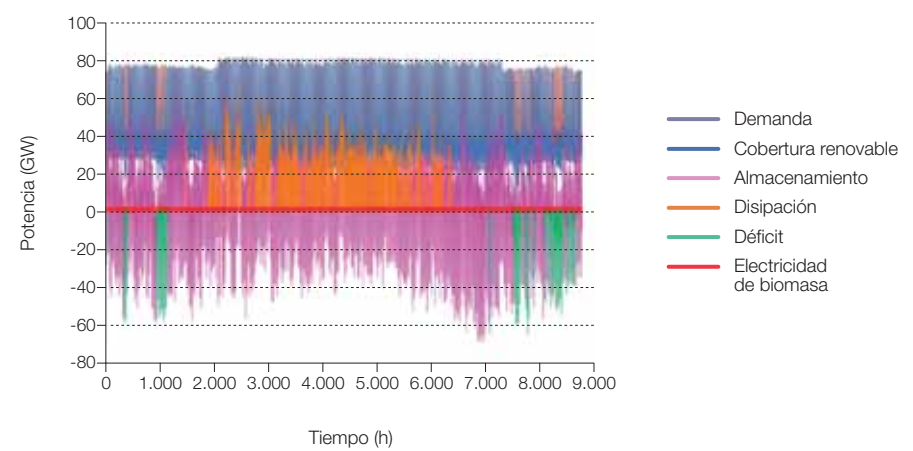


figura nos muestra también una participación muy activa del almacenamiento en la operación del sistema, con cargas y descargas continuas a lo largo de todo el año.

Figura 713. Evolución del estado de carga de la acumulación del sistema eléctrico en el mix-3b2 dimensionado para cubrir la demanda de electricidad directa (incluye EVs) del contexto E3.0 en el año 2050. $SM = 1,55$; $SF_{el\acute{e}ctrica} = 97,2\%$; $SF_{tot} = 57,6\%$; $F_{disipada} = 15,3\%$; $C = 3$ TWh; $CF_{global} = 31,5\%$; $A_{territorio} = 3,3\%$.

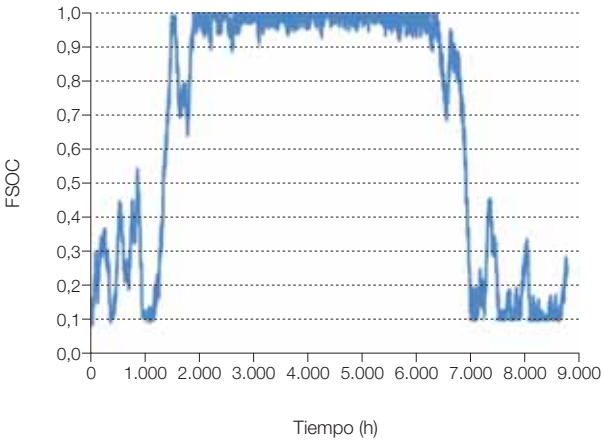


Figura 714. Coste específico normalizado de la generación de electricidad en el mix-3b2 dimensionado para cubrir la demanda de electricidad directa (incluye EVs) del contexto E3.0 en el año 2050. $SM = 1,55$; $SF_{el\acute{e}ctrica} = 97,2\%$; $SF_{tot} = 57,6\%$; $F_{disipada} = 15,3\%$; $C = 3$ TWh; $CF_{global} = 31,5\%$; $A_{territorio} = 3,3\%$.



Por lo que respecta a la capacidad de acumulación, la figura 713 nos reproduce su operación a lo largo del año. En las temporadas de inicio y final de año, el estado de carga de la acumulación es bajo, e indica una limitación en términos de potencia instalada, mientras que en las partes centrales del año el almacenamiento está totalmente lleno, indicando una limitación^{1.033} en términos de capacidad de acumulación.

Para terminar con este caso, la figura 714 recoge los LEC del caso-3b2 para cobertura de la demanda eléctrica del contexto E3.0, con estructuras de coste del año 2007 y del año 2050.

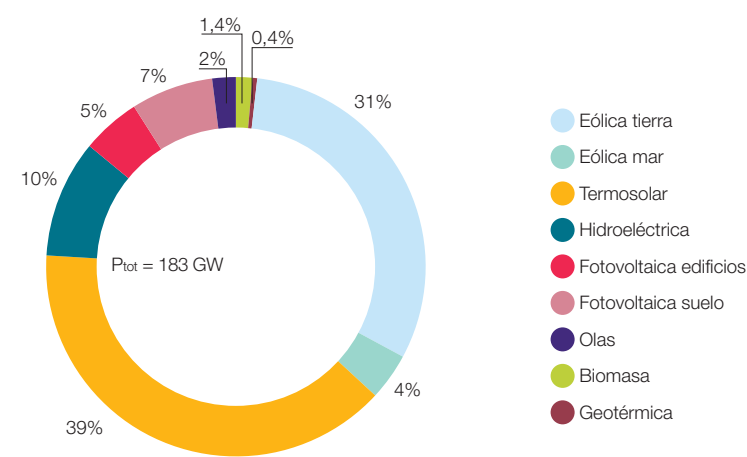
A continuación vamos a presentar los resultados del análisis de la cobertura de la demanda para el caso-3b3, correspondiente a la cobertura total de la demanda del contexto E3.0. Por tanto, este caso compara directamente con el caso-4b2 asociado a la cobertura total

de la demanda del contexto BAU con generación 100% renovable. Para facilitar la comparativa, se ha limitado la capacidad de acumulación del sistema eléctrico a 3 TWh, igual que en el caso-4b2.

Las figuras 715 y 716 presentan la estructura de la potencia instalada y la generación eléctrica para el caso-3b3 (cobertura total demanda E3.0 en el año 2050 sin gestión de la demanda).

La figura 717 nos muestra la comparación de la infraestructura energética necesaria para la cobertura de la demanda de energía total con generación renovable en los contextos BAU y E3.0 para el año 2050. Como podemos apreciar, el despliegue de eficiencia en el contexto E3.0 proporciona una reducción muy importante de la infraestructura energética necesaria, tanto para generación de electricidad como para generación y acumulación de hidrógeno.

Figura 715. Distribución de la potencia instalada en el caso-3b3 dimensionado para cubrir la demanda total del contexto E3.0 en el año 2050. SM = 2,25; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{disipada} = 0%; C = 3 TWh; CF_{global} = 37,7%; A_{territorio} = 4,3%.



1.033 Sin embargo, esta limitación es relativa, debido a que la disipación se empleará para la generación de hidrógeno, que añade capacidad de acumulación adicional al sistema energético.

Figura 716. Distribución de la generación en el caso-3b3 dimensionado para cubrir la demanda total del contexto E3.0 en el año 2050. SM = 2,25; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{disipada} = 0%; C = 3 TWh; CF_{global} = 37,7%; A_{territorio} = 4,3%.

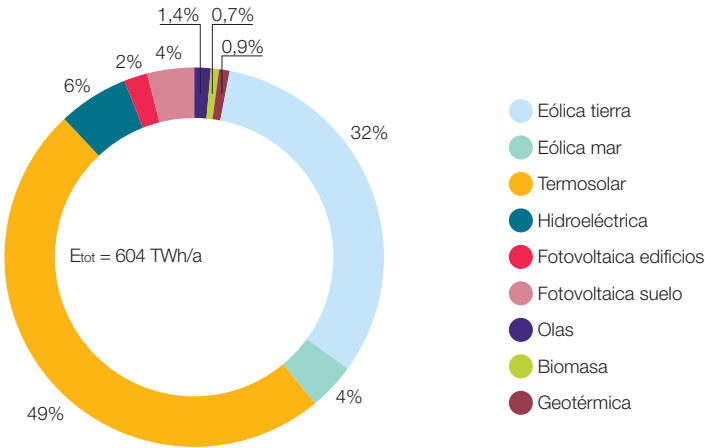
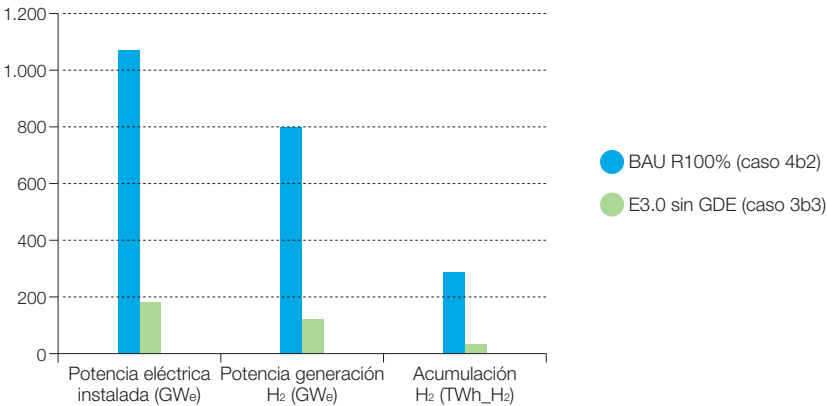


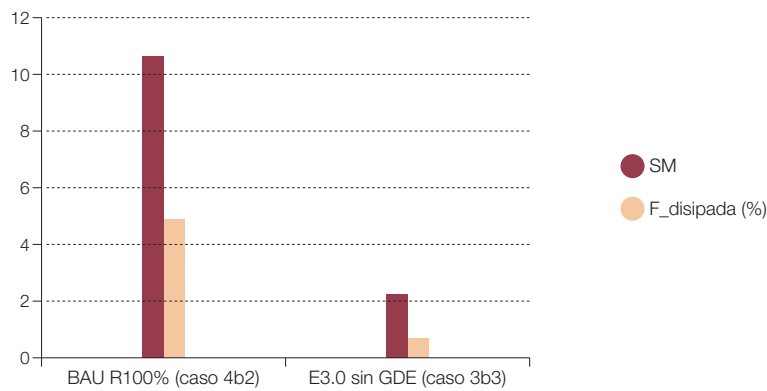
Figura 717. Comparación de la infraestructura energética necesaria para la cobertura de la demanda total con energías renovables en los contextos BAU y E3.0.



Uno de las ventajas del contexto E3.0 respecto al BAU es la integración del transporte en el sistema eléctrico. La eficiencia energética asociada a este aspecto se refleja claramente en la figura 718, en la que se puede observar como tanto el SM como la fracción de electricidad di-

sipada por el sistema eléctrico, y empleada para la generación de hidrógeno, son inferiores en el contexto E3.0 que en el BAU. De hecho, resulta sorprendente el bajo SM requerido en el contexto E3.0 para alcanzar la cobertura total de la demanda (SM = 2,25).

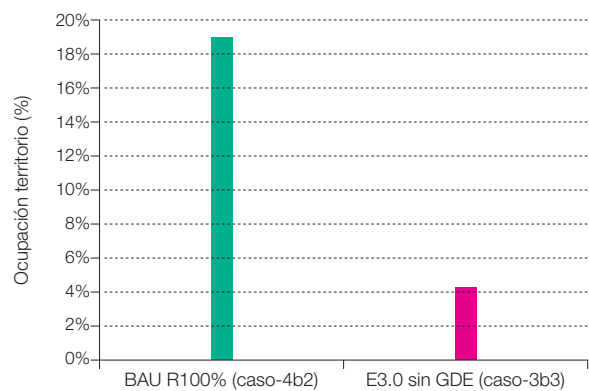
Figura 718. Comparación de la infraestructura energética necesaria para la cobertura de la demanda total con energías renovables en los contextos BAU y E3.0.



Otro indicador en el que podemos apreciar el efecto beneficioso del despliegue de eficiencia en el contexto E3.0 es en la ocupación del territorio. La figura 719 compara la ocupación del territorio del sistema eléctrico y de generación de hidrógeno^{1.034} al cubrir la demanda con 100% renovables en los contextos BAU y E3.0.

La figura 720 recoge los resultados del análisis de la cobertura de la demanda para el caso-3b3. Como podemos observar la demanda eléctrica se cubre completamente, y la disipación del sistema eléctrico tiene una distribución más homogénea a lo largo del año, y proporciona la capacidad de generación

Figura 719. Comparación de la ocupación del territorio por el sistema eléctrico y de generación de hidrógeno para la cobertura de la demanda total con energías renovables en los contextos BAU y E3.0.



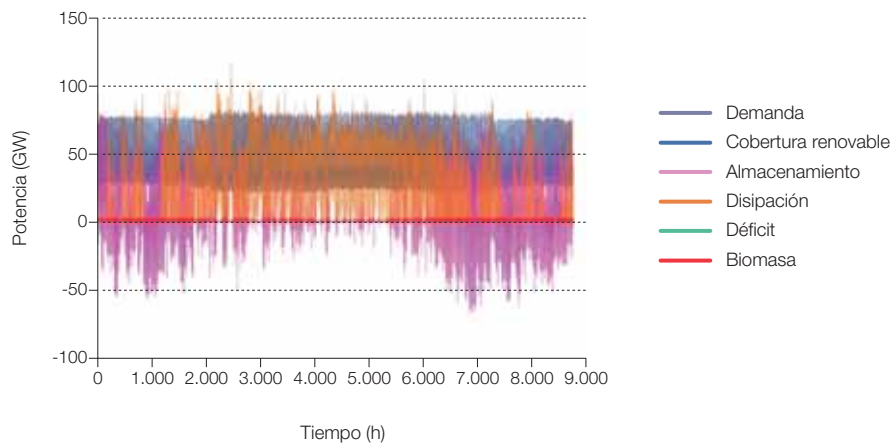
1.034 La ocupación total del territorio asociada al sistema energético es superior a estos valores al incluir los requerimientos de superficie para la producción de biomasa y biocombustibles no dedicados a la generación de electricidad.

necesaria para cubrir la demanda de hidrógeno del sistema. Al comparar esta figura con la correspondiente al caso BAU con cobertura 100% renovable (caso-4b2), podemos observar cómo la disipación está mucho más equilibrada con los requerimientos del sistema eléctrico, lo cual también queda manifiesto por el bajo múltiplo solar necesario ($SM = 2,25$). Este aspecto es de gran importancia desde el punto de vista de los requerimientos de ampliación de la red de transporte eléctrico. Por lo que respecta al uso del almacenamiento del sistema eléctrico, vemos que este es bastante intenso al principio y final del año, pero mucho más bajo en la parte central del año. Con la biomasa sucede lo mismo, y se reduce su uso respecto al caso anterior, requiriendo ahora el consumo de 14 TWh/a de biomasa.

Por lo que respecta a la acumulación de hidrógeno, la figura 721 recoge las potencias de carga y descarga de la acumulación de hidrógeno^{1.035} (en términos eléctricos equivalentes), mientras que la figura 722 recoge la

evolución del estado de carga de la acumulación de hidrógeno necesaria para integrar toda la potencia disipada por el sistema de generación eléctrica. La capacidad de acumulación de hidrógeno necesaria es de 33 TWh_{H2}, que corresponde a una reserva de 102 días, siendo la carga mínima de la acumulación de hidrógeno de 2 TWh_{H2}, equivalente a 6 días de acumulación, que es el estado de carga que aparece el 16 de febrero. Como podemos ver, estas capacidades de acumulación de hidrógeno son muy inferiores a las que se requerían en el contexto BAU.

Figura 720. Análisis de la cobertura de la demanda con el mix-3b3 dimensionado para cubrir la demanda total del contexto E3.0. $SM = 2,25$; $SF_{eléctrica} = 100\%$; $SF_{tot} = 100\%$; $F_{disipada} = 0\%$; $C = 3$ TWh; $CF_{global} = 37,7\%$; $A_{territorio} = 4,3\%$.



1.035 La potencia de carga máxima es inferior a la potencia requerida para generación de hidrógeno (117 GW_a) como consecuencia de la simultaneidad de la generación con el consumo. Es decir, dada la simultaneidad entre generación y consumo, la potencia neta de carga del sistema de acumulación de hidrógeno es inferior a la potencia máxima de generación de hidrógeno, pues en el instante de tiempo en que se alcanza la potencia máxima de generación, existe una potencia de descarga del sistema de acumulación no nula.

Figura 721. Evolución de las potencias de carga y descarga de la acumulación de hidrógeno con el mix-3b3 dimensionado para cubrir la demanda total del contexto E3.0. SM = 2,25; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{dissipada} = 0%; C = 3 TWh; CF_{global} = 37,7%; A_{territorio} = 4,3%.

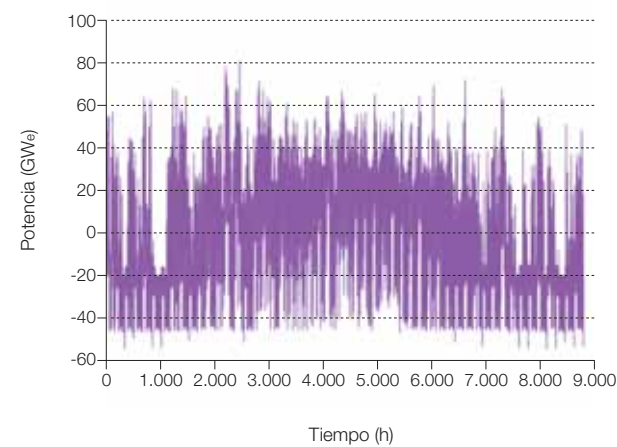
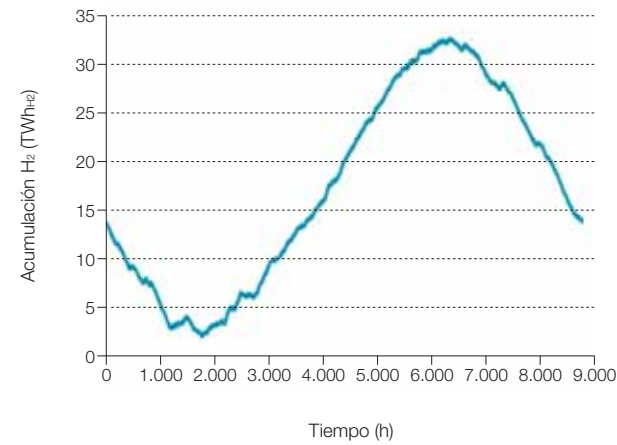


Figura 722. Evolución del estado de carga de la acumulación de hidrógeno con el mix-3b3 dimensionado para cubrir la demanda total del contexto E3.0. SM = 2,25; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{dissipada} = 0%; C = 3 TWh; CF_{global} = 37,7%; A_{territorio} = 4,3%.

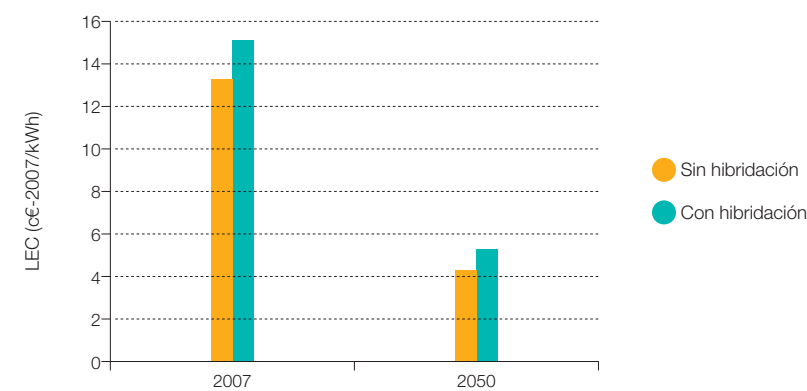


En la figura 723 presentamos los LEC de la generación eléctrica para el caso-3b3, con y sin incorporar el efecto de la hibridación termosolar. Como podemos observar, en este caso el efecto de la hibridación termosolar es más elevado que en el caso del contexto BAU. Esto es debido a que el menor sobredimensionado de la potencia eléctrica requerido para dar cobertura a la demanda de hidrógeno hace que el peso relativo del coste de la hibridación termosolar sea más elevado^{1.036}.

Las figuras 724 y 725 nos muestran la comparación de los LEC de generación eléctrica para cobertura de la demanda total, correspondientes a los contextos BAU y E3.0. Como podemos observar, por lo general el LEC correspondiente al contexto E3.0 es inferior al del BAU, como consecuencia de que el menor requerimiento de potencia instalada permite cubrir la demanda con una participación menor de las tecnologías más caras. Sin embargo, al tener en cuenta la hibridación termosolar, los LEC se igualan bastante e incluso se hacen superior con la estructura de costes

del año 2050 para el caso E3.0. El motivo de este resultado es que para el contexto E3.0 el sobredimensionado necesario del sistema de generación eléctrica para dar cobertura a la demanda de hidrógeno es muy inferior al del contexto BAU, por lo que el peso relativo de la hibridación termosolar es mucho más importante. De hecho, como comentamos en su momento, para el contexto BAU el gran sobredimensionado de la potencia de generación necesario para dar cobertura a la demanda de hidrógeno hace que la hibridación termosolar resulte redundante, mientras que en el contexto E3.0 sin participación de la gestión de la demanda sí que es necesaria esta hibridación para garantizar la cobertura de la demanda. Por tanto, los LEC asociados a la generación eléctrica son del mismo orden^{1.037} para los contextos BAU y E3.0.

Figura 723. LEC de generación eléctrica para mix-3b3 dimensionado para cubrir la demanda total del contexto E3.0. SM =2,25; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{disipada} =0%; C = 3 TWh; CF_{global} = 37,7%; A_{territorio} = 4,3%.



1.036 En los resultados mostrados, la hibridación termosolar incrementa el LEC del sistema eléctrico por constituir principalmente un elemento de seguridad de suministro que conlleva una inversión adicional. En el estudio (R100%, 2006), donde se desarrolló el análisis de la cobertura de la demanda eléctrica con renovables en un escenario de electrificación BAU, en la que la generación de electricidad cubría una parte relativamente pequeña de la demanda total del sistema energético, la hibridación termosolar conducía a la reducción del LEC del sistema eléctrico, al permitir la cobertura de una demanda residual, de forma mucho más económica que el incrementar la potencia renovable instalada (por el bajo factor de capacidad con el que se usaba esta potencia adicional). Sin embargo, en la situación actual en que tratamos la cobertura de la demanda del sistema energético total, vía la electrificación directa o indirecta (mediante generación de hidrógeno), el requerimiento de potencia instalada en relación a la demanda de electricidad directa es más elevado (para dar cobertura a la demanda de hidrógeno), por lo que su capacidad de cobertura de la demanda de electricidad directa es también mayor. En este contexto, la hibridación termosolar recogida en estos resultados, constituye una inversión adicional encaminada fundamentalmente a incrementar la seguridad de suministro. Pero la conclusión general obtenida en (R100%, 2006) sigue siendo válida: a igualdad de cobertura de la demanda y de seguridad de suministro, la hibridación con biomasa de parte de la potencia termosolar instalada sigue representando una de las opciones más favorables para proporcionar servicios de regulación o para cubrir elementos de demanda residual, debido a que comparte el bloque de potencia con la central termosolar.

1.037 Sin embargo, el coste total asociado a la generación eléctrica será muy inferior en el contexto E3.0 como consecuencia de la menor demanda de generación eléctrica.

Figura 724. Comparación entre los LEC de generación eléctrica para la cobertura total de la demanda en los contextos BAU y E3.0. Sin incorporar los costes asociados a la hibridación termosolar.

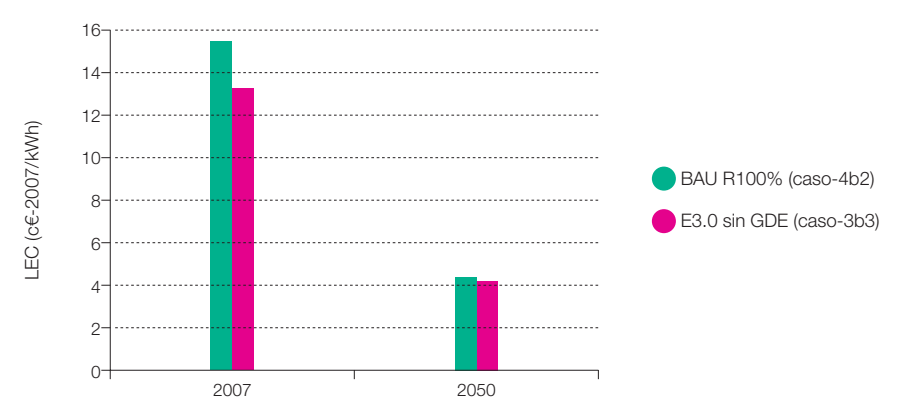
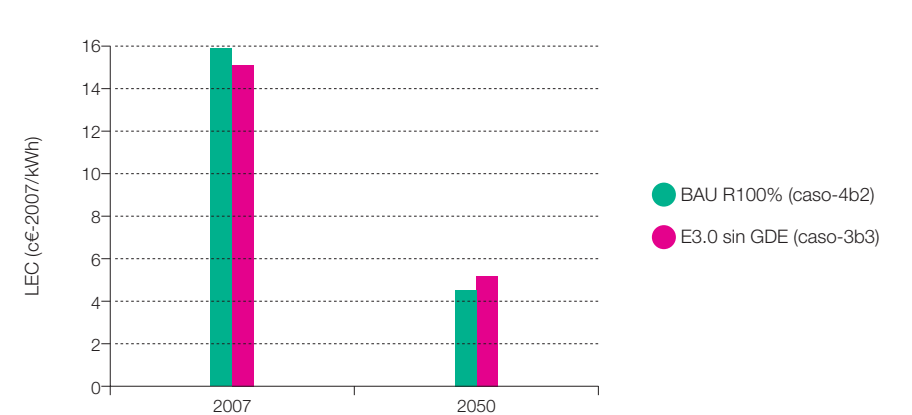


Figura 725. Comparación entre los LEC de generación eléctrica para la cobertura total de la demanda en los contextos BAU y E3.0. Incorporando los costes asociados a la hibridación termosolar.



Por último, por lo que respecta a este caso-3b3, las figuras 726 y 727 recogen la comparativa de los LEC asociados a la generación eléctrica en el contexto E3.0 para los casos de sistema energético no integrado (caso-3b2), y sistema energético integrado (caso-3b3), donde el concepto de integración se refiere al aprovechamiento de la disipación del sistema eléctrico para generar hidrógeno.

Figura 726. Comparación de los LEC de generación eléctrica para la cobertura de la demanda E3.0 sin y con integración del sistema energético (uso de la disipación del sistema eléctrico para producir hidrógeno). Caso sin incluir los costes de la hibridación termosolar.

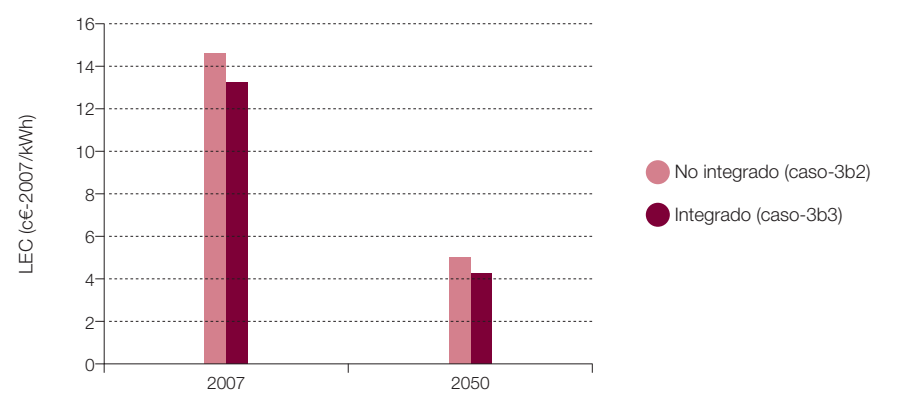
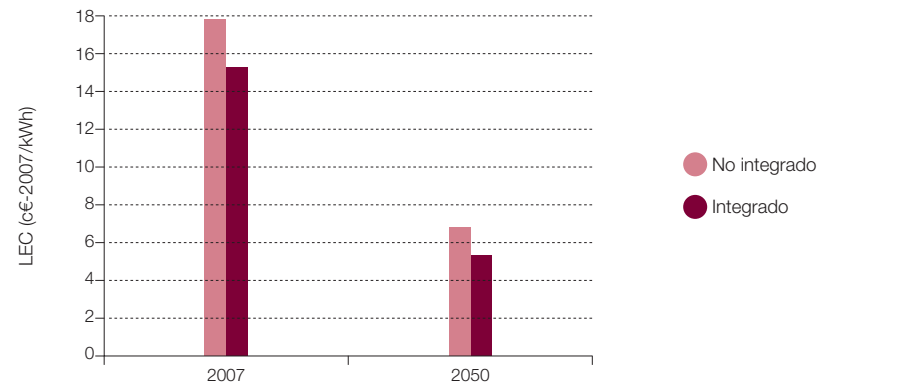


Figura 727. Comparación de los LEC de generación eléctrica para la cobertura de la demanda E3.0 sin y con integración del sistema energético (uso de la disipación del sistema eléctrico para producir hidrógeno). Caso que incluye los costes de la hibridación termosolar.



5.6.2 Cobertura con gestión
de la demanda

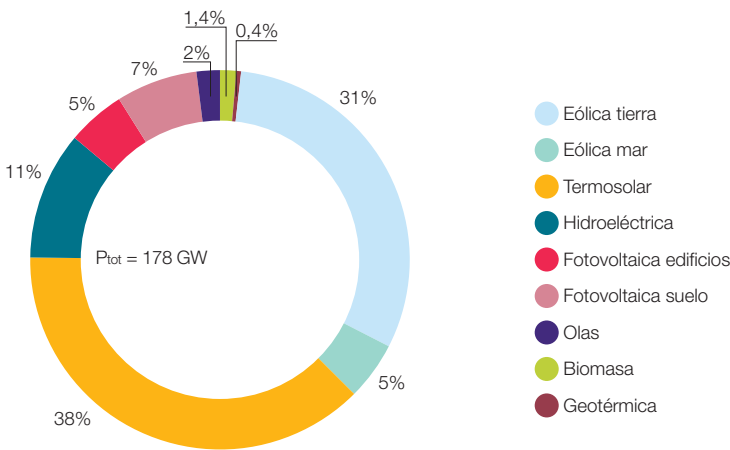
En este punto pasamos a analizar la cobertura de la demanda en el contexto E3.0 con participación de la demanda en la operación del sistema.

Por lo que respecta a la demanda de electricidad directa, en este caso se modifica la recarga de los vehículos eléctricos, y pasa de una recarga nocturna con horario prefijado del caso anterior, a una demanda coincidente con la de movilidad cubierta dinámicamente a lo largo del año según las posibilidades del sistema de generación y aportando una interacción bidireccional (V2G) con el sistema eléctrico, gestionada a través de las baterías de acumulación de los vehículos eléctricos.

El mix-3b3b ha sido dimensionado para la cobertura total de la demanda en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda. Las figuras 728 y 729 reproducen la distribución de potencia eléctrica instalada y de generación eléctrica.

Por tanto, este caso añade una mayor capacidad de regulación del sistema eléctrico (flexibilidad), que se materializa en la capacidad de acumulación y potencia de regulación disponible. En las figuras 730 y 731 recogemos el reparto de capacidad de regulación, en términos de acumulación^{1.038} y de potencia, para la operación del sistema en el contexto E3.0 con participación de la demanda.

Figura 728. Distribución de la potencia instalada para el caso-3b3b dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda. SM = 2,59; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{disipada} = 0%; CF_{global} = 38,7%; C = 23.72 TWh; A_{territorio} = 4,2%.



1.038 Como puede apreciarse, en términos de capacidad de acumulación, la hidroeléctrica regulada es la tecnología dominante. Esta capacidad de acumulación de la hidroeléctrica regulada no es un elemento nuevo del contexto E3.0, pues se trata de la capacidad de acumulación hidroeléctrica actualmente existente, y por tanto también existe en el mix energético del contexto BAU. La diferencia fundamental estriba en la forma en que se usa esta capacidad de acumulación en el contexto BAU (o en la actualidad) y en el contexto E3.0, quedando en el contexto E3.0 al servicio de los requerimientos de regulación del sistema energético.

Figura 729. Distribución de la generación eléctrica para el caso-3b3b dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda. SM = 2,59; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{dissipada} = 0%; CF_{global} = 38,7%; C = 23,72 TWh; A_{territorio} = 4,2%.

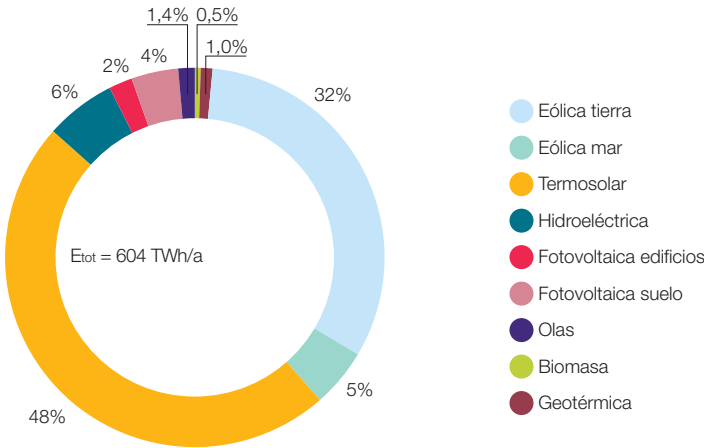
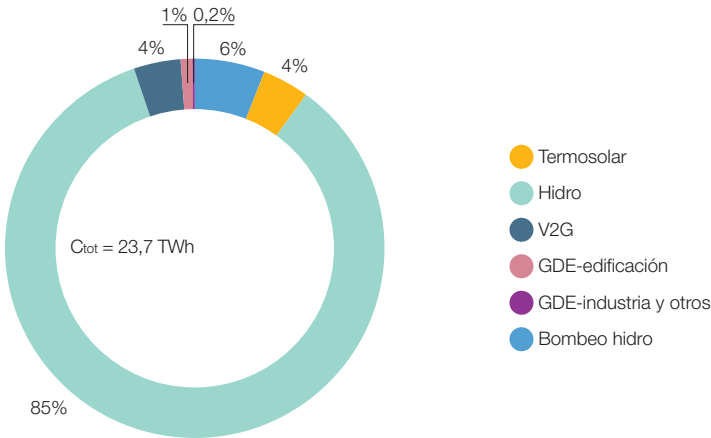


Figura 730. Capacidad de acumulación a disposición del sistema eléctrico para el caso con GDE.



Por lo que respecta a la capacidad de acumulación, en la figura 730 podemos observar cómo sigue dominada por la hidroeléctrica regulada^{1.039}. La termosolar y el bombeo hidroeléctrico son otras dos contribuciones por el lado de la oferta de las que

también disponíamos en el caso anterior. Las nuevas aportaciones a la capacidad de acumulación del sistema eléctrico son la correspondiente a la capacidad disponible para el sistema de las baterías de los vehículos eléctricos (V2G), y la gestión de la

1.039 Sin embargo, es preciso tener presente las diferencias en el carácter cualitativo de estas capacidades de acumulación: mientras que la hidroeléctrica regulada y la termosolar proporcionan una capacidad de acumulación unidireccional, es decir, tan solo permiten ser aplicadas para gestionar el recurso energético (agua o sol), el resto proporcionan una capacidad de acumulación bidireccional, y permiten absorber y desfasar en el tiempo el exceso de capacidad de generación del resto del sistema, y por tanto constituyen elementos de regulación mucho más versátiles.

demanda, básicamente en el sector edificación y en el sector industrial. La capacidad de acumulación del sector edificación proviene principalmente de la capacidad inercial de los edificios^{1.040} y de los sistemas de producción de frío. En la industria, la capacidad de acumulación proviene también principalmente de los elementos de acumulación inercial disponibles^{1.041}.

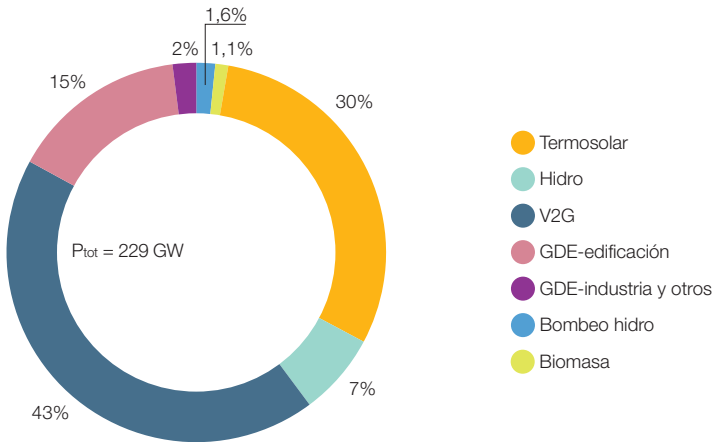
Por tanto, vemos en la figura 730 cómo desde el punto de vista de la capacidad de acumulación, la contribución de la gestión de la demanda no proporciona grandes contribuciones a la capacidad de regulación del sistema eléctrico, respecto a los elementos ya disponibles desde el lado de la oferta. Por otro lado, la integración del sistema energético proporciona un gran incremento de la capacidad de acumulación en forma de acumulación de hidrógeno^{1.042}, que también estaba disponible en el caso anterior sin participación de la gestión de la demanda^{1.043}.

Pero tal y como ya se apuntó en el informe R100% (GP, 2007), y como hemos visto

reflejado en los casos anteriormente analizados para el contexto BAU y el E3.0 sin gestión de la demanda, los requerimientos de flexibilidad para la regulación de un sistema eléctrico basado en energías renovables son, sobre todo, en términos de potencia y no de capacidad de acumulación^{1.044}.

En la figura 731 mostramos el desglose de potencia de regulación gestionable a disposición del sistema eléctrico para el contexto E3.0 con participación de la gestión de la demanda. Y es precisamente aquí, donde vemos la contribución real de la gestión de la demanda a la flexibilización del sistema energético: en el gran incremento de potencia de regulación disponible. En efecto, como podemos apreciar, la hidroeléctrica regulada, dominante en términos de capacidad, proporciona una contribución de segundo orden, y está dominada la disponibilidad de potencia de regulación por la participación de los elementos de gestión de la demanda, entre los que destaca de forma importante la interacción bidireccional de los vehículos eléctricos con el sistema eléctrico (V2G).

Figura 731. Potencia de regulación gestionable a disposición del sistema eléctrico para el caso con GDE.



1.040 Acumulación de frío o calor en la estructura del edificio para desfasar su suministro a los espacios climatizados. En efecto, mediante pequeñas variaciones del punto de consigna de los espacios a climatizar (que no producen alteraciones apreciables de las condiciones de confort), los edificios pueden absorber el exceso de capacidad de generación del sistema (incremento consigna termostato en modo calefacción o reducción consigna termostato en modo refrigeración), o reducir su demanda para responder a una reducción de capacidad de generación del sistema (reducción consigna termostato en modo calefacción o incremento consigna termostato en modo refrigeración). El empleo de sistemas de distribución térmica inerciales (suelos o muros radiantes, materiales de cambio de fase, etc.) potencia esta capacidad inercial de los edificios para contribuir a la regulación del sistema.

1.041 En el caso del sector industrial, la capacidad inercial se encuentra representada tanto por los procesos de calentamiento/enfriamiento de sustancias, como por la acumulación másica de reactivos intermedios o productos.

1.042 Capacidad del orden del doble de la de la hidroeléctrica regulada que domina la capacidad de acumulación del sistema eléctrico.

1.043 Nótese que en esencia, la acumulación de hidrógeno se podría considerar como una medida de gestión de la demanda. Pero el hecho de que esta capacidad de regulación resulte indispensable para la operación del sistema, y anticipando una contribución dominante en el despliegue de esta capacidad de acumulación desde el lado de la oferta, la hemos considerado incorporada en el caso sin participación de la gestión de la demanda. Por tanto, el elemento diferencial de este caso es la articulación de la participación de los elementos de demanda eléctrica en la operación del sistema.

1.044 Este es el motivo fundamental por el que la hibridación termosolar se distingue como el elemento fundamental de regulación en los sistemas 100% renovables gobernados tan solo desde el lado de la oferta.

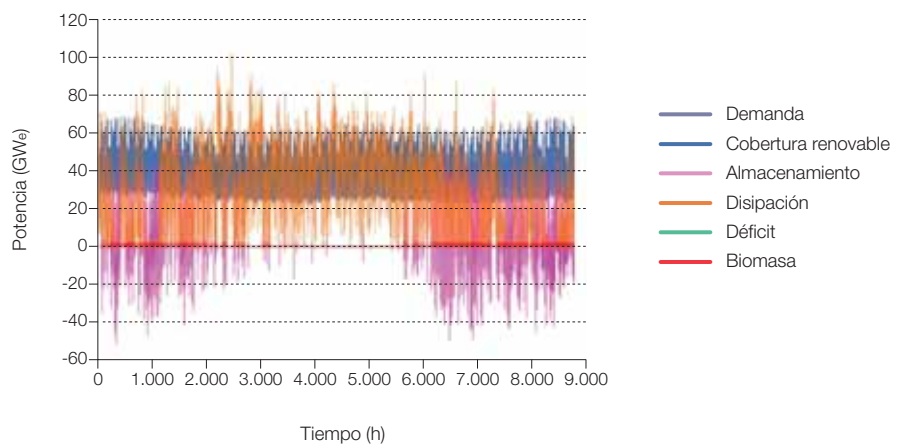
Es de resaltar que en esta figura no hemos incluido la hibridación termosolar: la gran disponibilidad de potencia de regulación por el lado de la demanda, hace que no se requiera la participación de la hibridación termosolar para la operación del sistema eléctrico en este caso.

La figura 732 nos recoge el resultado del análisis de la cobertura de la demanda para el caso-3b3b dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda, mientras que la figura 733 recoge la evolución del estado de carga de la capacidad de acumulación puesta a disposición del sistema eléctrico. Como podemos observar, las potencias de regulación utilizadas a lo largo de todo el año quedan muy por debajo de la disponibilidad que proporcionan los elementos de flexibilidad del mix de generación (229 GWe de la figura 731). Por tanto, la hibridación termosolar es innecesaria, y a

pesar de no incorporarla, el gran exceso de potencia de regulación disponible, proporciona una muy elevada seguridad de suministro.

La figura 733 nos muestra la evolución del estado de carga de la capacidad de acumulación puesta a disposición del sistema eléctrico para el caso-3b3b, dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050, con participación de la gestión de la demanda. Como podemos observar, el estado de carga de la acumulación permanece prácticamente lleno todo el año. Incluso a principio y final del año, en el que se observan unas descargas mayores de la capacidad de acumulación, podemos observar que estas descargas apenas alcanzan el 3% de la capacidad de acumulación disponible^{1.045}. Este resultado confirma una vez más que los requerimientos de regulación de un sistema de generación basado en energías renovables son fundamentalmente en términos de potencia, y no en términos

Figura 732. Análisis de la cobertura de la demanda para el caso-3b3b dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda. SM = 2,59; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{disipada} = 0%; CF_{global} = 38,7%; C = 23.72 TWh; A_{territorio} = 4,2%.



1.045 En estas condiciones, incluso el bombeo hidroeléctrico resulta redundante, y desempeña por tanto un papel exclusivamente de seguridad de suministro, y no es preciso recurrir a la ineficiencia asociada al uso de esta capacidad de acumulación (30% de pérdidas en proceso de bombeo-turbinación).

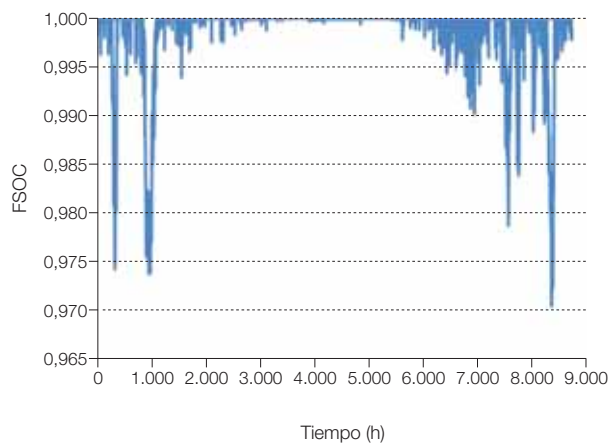
de capacidad de acumulación. Adicionalmente, el gran exceso de capacidad de acumulación disponible para el sistema eléctrico nos proporciona otra confirmación de la seguridad de suministro obtenida.

Uno de los elementos que contribuye a que el estado de carga de la capacidad de acumulación sea tan elevado a lo largo de todo el año es el exceso de potencia que se ha tenido que instalar para proporcionar cobertura a la demanda de hidrógeno. La consecuencia de que el estado de carga de la capacidad de acumulación sea tan elevado es que la potencia disipada por el sistema eléctrico, que es la que alimenta al sistema de generación de hidrógeno, alcanza picos elevados^{1.046}, que repercuten directamente sobre la capacidad de generación de hidrógeno que es preciso instalar. Cabe por tanto pensar que el manejo integrado de las capacidades de acumulación del sistema eléctrico y del hidrógeno pudieran

permitir reducir el requerimiento de potencia de generación de hidrógeno a instalar, y reducir por tanto los costes de inversión totales asociados al sistema energético. Posteriormente exploraremos esta posibilidad.

Las figuras 734 y 735 nos muestran la evolución de las potencias de carga y descarga del sistema de acumulación de hidrógeno, así como la evolución del estado de carga del mismo, para el caso-3b3b, dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda. La capacidad requerida de la acumulación de hidrógeno es de 27,7 TWh_{H2} (equivalente a una reserva de 87 días), alcanzando una carga mínima de 2 TWh_{H2} (equivalente a una reserva de seis días) el 15 de febrero.

Figura 733. Evolución del estado de carga (FSOC) de la capacidad de acumulación puesta a disposición del sistema eléctrico para el caso-3b3b, dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda. SM = 2,59; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{disipada} = 0%; CF_{global} = 38,7%; C = 23,72 TWh; A_{territorio} = 4,2%.



1.046 Del orden de 102 GW en este caso.

Figura 734. Evolución de las potencias de carga y descarga del sistema de acumulación de hidrógeno, en términos eléctricos equivalentes, para el caso-3b3b, dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda. SM = 2,59; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{dissipada} = 0%; CF_{global} = 38,7%; C = 23,72 TWh; A_{territorio} = 4,2%.

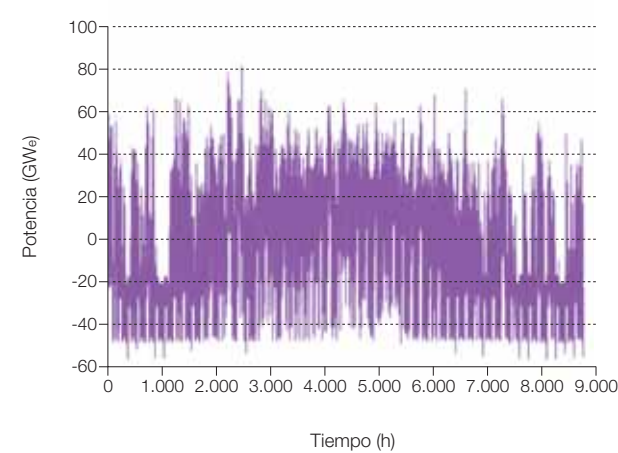
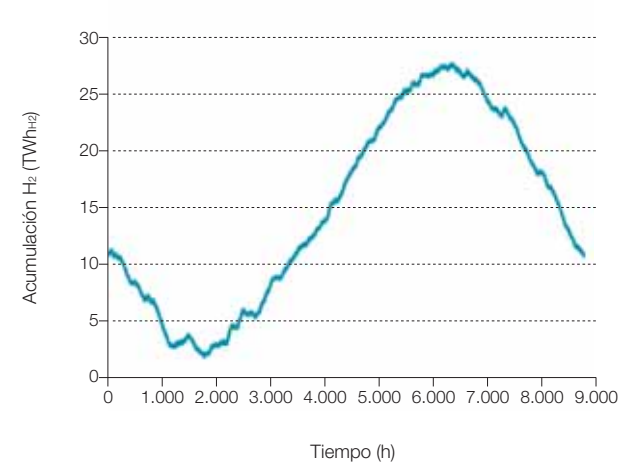


Figura 735. Evolución del estado de carga del sistema de acumulación de hidrógeno para el caso-3b3b, dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda. SM = 2,59; SF_{eléctrica} = 100%; SF_{tot} = 100%; F_{dissipada} = 0%; CF_{global} = 38,7%; C = 23,72 TWh; A_{territorio} = 4,2%.



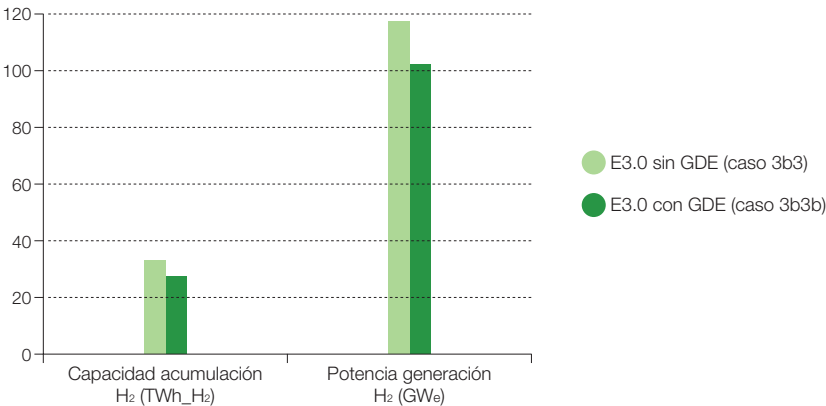
La figura 736 permite comparar directamente los requerimientos de regulación de hidrógeno, en términos de potencia de generación y de capacidad de acumulación, para los casos de los mix-3b3 (E3.0 sin GDE) y mix-3b3b (E3.0 con GDE) correspondientes a la cobertura de la demanda en el contexto E3.0 y el año 2050, sin (3b3) y con (3b3b) participación de la gestión de la demanda (GDE). Como podemos observar, la participación de la gestión de la demanda nos aporta beneficios en relación a los requerimientos de potencia de generación^{1.047} de hidrógeno y de capacidad de acumulación, que se ven reducidos.

En términos de costes, estos beneficios de la incorporación de la gestión de la demanda sobre la reducción de requerimientos de regulación de hidrógeno, se reflejan en una reducción de la contribución de la acumulación y la generación de hidrógeno sobre el conjunto del sistema energético. Las figuras 737 y 738 nos recogen esta comparativa de la

contribución a los costes normalizados de producción de hidrógeno, tanto para la acumulación de hidrógeno como para su generación. En ambos casos, los costes están expresados por unidad de kWh de hidrógeno demandado, y en el caso de la generación, incluye tan solo los costes de inversión asociados a las instalaciones para generación de hidrógeno, es decir, no incluye el coste de la electricidad necesaria para producir ese hidrógeno (que se contabilizará a parte).

Y a estos beneficios de costes, asociados a la reducción de requerimientos de regulación del sistema de hidrógeno, hay que añadir los beneficios que la participación de la gestión de la demanda nos proporcionan en términos de la reducción de la potencia de generación eléctrica necesaria (178 GW frente a 183 GW), y la eliminación del requerimiento de hibridación termosolar para regular el sistema eléctrico desde el lado de la oferta, que se traducen en una reducción del LEC de generación eléctrica que queda recogida en la figura 739.

Figura 736. Comparativa de la capacidad de acumulación de hidrógeno y la potencia de generación de hidrógeno requerida en los casos de los mix-3b3 (E3.0 sin GDE) y mix-3b3b (E3.0 con GDE) correspondientes a la cobertura de la demanda en el contexto E3.0 y el año 2050, sin (3b3) y con (3b3b) participación de la gestión de la demanda (GDE).



1.047 La reducción de la potencia de generación de hidrógeno requerida conduce a un incremento del factor de capacidad con el que se usará este equipo, y por tanto a una reducción de su contribución al coste total del sistema energético.

Figura 737. Comparativa de los costes normalizados de acumulación de hidrógeno (expresados en términos específicos referidos a la demanda anual de hidrógeno) en los casos de los mix-3b3 (E3.0 sin GDE) y mix-3b3b (E3.0 con GDE) correspondientes a la cobertura de la demanda en el contexto E3.0 y el año 2050, sin (3b3) y con (3b3b) participación de la gestión de la demanda (GDE).



Figura 738. Comparativa de los costes normalizados de generación de hidrógeno (expresados en términos específicos referidos a la demanda anual de hidrógeno, y sin incluir los costes de generación de la electricidad necesaria) en los casos de los mix-3b3 (E3.0 sin GDE) y mix-3b3b (E3.0 con GDE) correspondientes a la cobertura de la demanda en el contexto E3.0 y el año 2050, sin (3b3) y con (3b3b) participación de la gestión de la demanda (GDE).

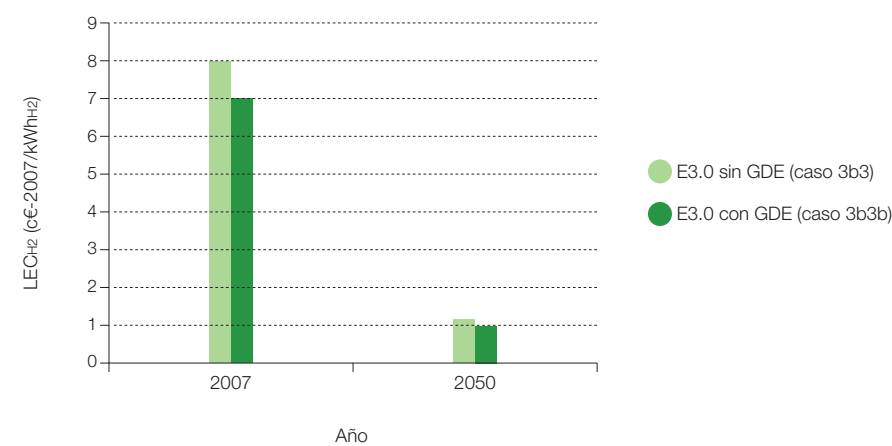
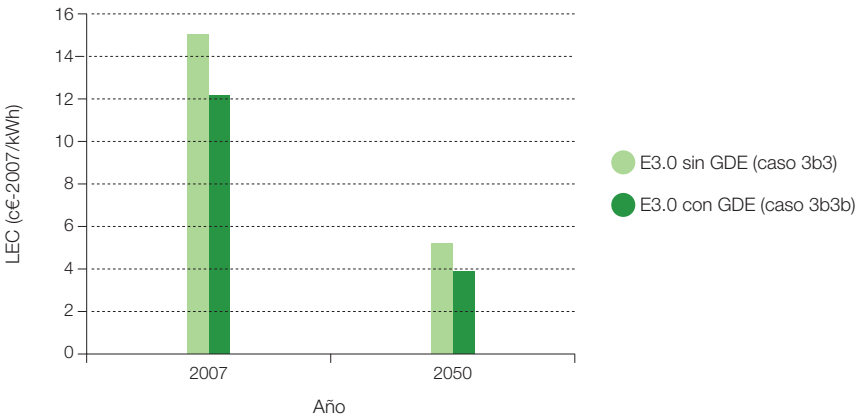


Figura 739. Comparativa de los LEC asociados a la generación de electricidad para los casos de los mix-3b3 (E3.0 sin GDE) y mix-3b3b (E3.0 con GDE) correspondientes a la cobertura de la demanda en el contexto E3.0 y el año 2050, sin (3b3) y con (3b3b) participación de la gestión de la demanda (GDE).



A continuación presentamos los resultados del caso-7, dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 y año 2050, con participación de la gestión de la demanda, e integrando las capacidades de acumulación eléctrica y de hidrógeno con el fin de reducir los requerimientos de infraestructura para la generación de hidrógeno.

Como veíamos en el caso anterior (caso-3b3b), el exceso de potencia eléctrica requerida para la producción de hidrógeno, conduce a mantener prácticamente en un estado de carga total la capacidad de acumulación, puesta a disposición del sistema eléctrico, lo cual trae como consecuencia que las potencias disipadas por el sistema eléctrico, y que sirven para la generación de hidrógeno, alcancen picos elevados que condicionan la capacidad a instalar de infraestructura de generación de hidrógeno. Puesto que el sistema energético también requiere una capacidad de acumulación de

hidrógeno mayor que la disponible por el sistema eléctrico, cabe pensar que una gestión integrada del conjunto de acumulación total puesta a disposición del sistema, podría permitir relajar el requerimiento de potencia a instalar para la generación de hidrógeno^{1.048}. Con el caso-7 hemos querido realizar una primera aproximación a esta gestión integrada para evaluar sus potenciales beneficios.

El mix de generación del caso-7 es el mismo que el del caso-3b3b, pues la demanda total de electricidad a cubrir sigue siendo la misma, y la capacidad de acumulación total también es la misma, pero ahora se encuentra integrada la capacidad de acumulación del sistema eléctrico (23,72 TWh) con la del sistema de acumulación de hidrógeno, que en términos eléctricos corresponde a 58,5 TWh, y da un total de capacidad de acumulación disponible para el conjunto del sistema energético de 82,2 TWh.

1.048 En efecto, esta gestión integrada de la capacidad de acumulación podría permitir vaciar más la capacidad de acumulación del sistema eléctrico a costa de anticipar la generación de hidrógeno, de tal forma que cuando se presentaran los picos de disipación del sistema eléctrico hubiera disponible capacidad de acumulación en el mismo para reducirlos.

Figura 740. Análisis de la cobertura de la demanda para el caso-7, dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda e integración de la gestión de acumulación del sistema eléctrico y del sistema de hidrógeno. $SM = 2,59$; $SF_{eléctrica} = 100\%$; $SF_{tot} = 100\%$; $F_{disipada} = 0\%$; $CF_{global} = 38,7\%$; $C = 82,2 \text{ TWh}$; $A_{territorio} = 4,2\%$.

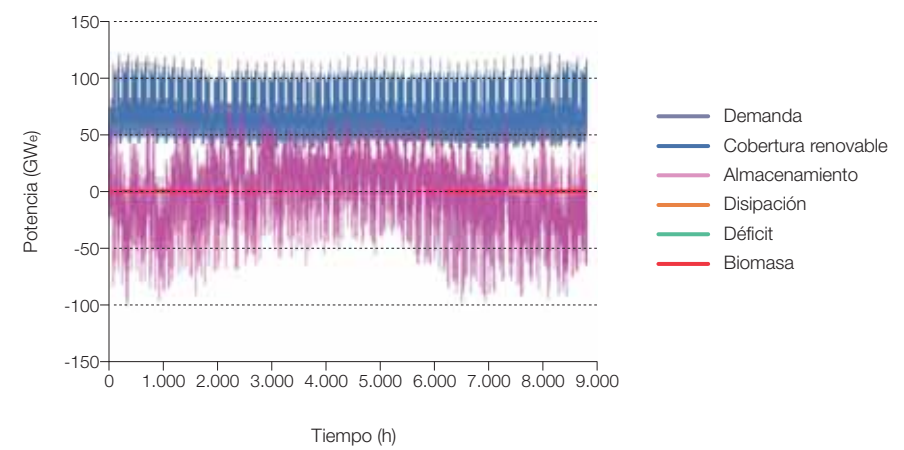
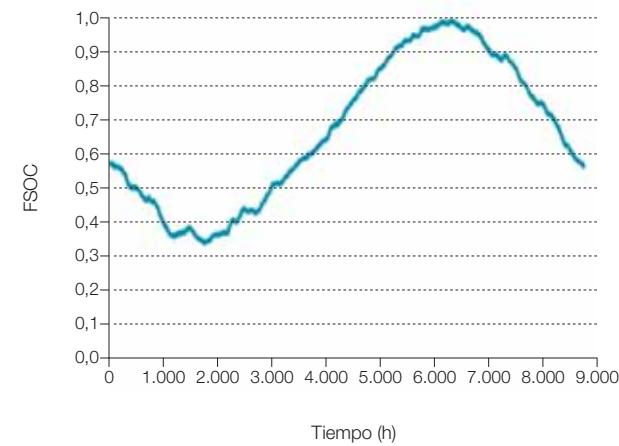


Figura 741. Evolución del estado de carga de la capacidad de acumulación total puesta a disposición del sistema energético para el caso-7, dimensionado para la cobertura de la demanda total en el contexto E3.0 para el año 2050 con participación de la gestión de la demanda e integración de la gestión de acumulación del sistema eléctrico y del sistema de hidrógeno. $SM = 2,59$; $SF_{eléctrica} = 100\%$; $SF_{tot} = 100\%$; $F_{disipada} = 0\%$; $CF_{global} = 38,7\%$; $C = 82,2 \text{ TWh}$; $A_{territorio} = 4,2\%$.



La figura 740 nos muestra el resultado del análisis de la cobertura de la demanda en este caso, mientras que la figura 741 recoge la evolución de la capacidad de acumulación total del sistema energético.

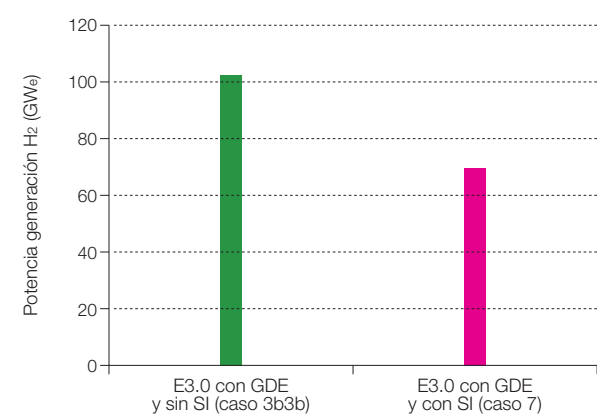
En la figura 742 podemos ver comparados los requerimientos de potencia de generación de hidrógeno a instalar, y apreciar una significativa reducción de la misma, gracias a la integración de la gestión de la acumulación de los subsistemas eléctrico y de hidrógeno.

En términos de costes, la figura 743 nos compara los costes normalizados de generación de hidrógeno (sin incluir los costes del consumo de electricidad asociado) para los casos sin y con integración de la gestión del sistema de acumulación, y se puede apreciar, cómo especialmente al principio del periodo de

tiempo considerado^{1.049} el beneficio de esta integración de los sistemas de acumulación es elevado.

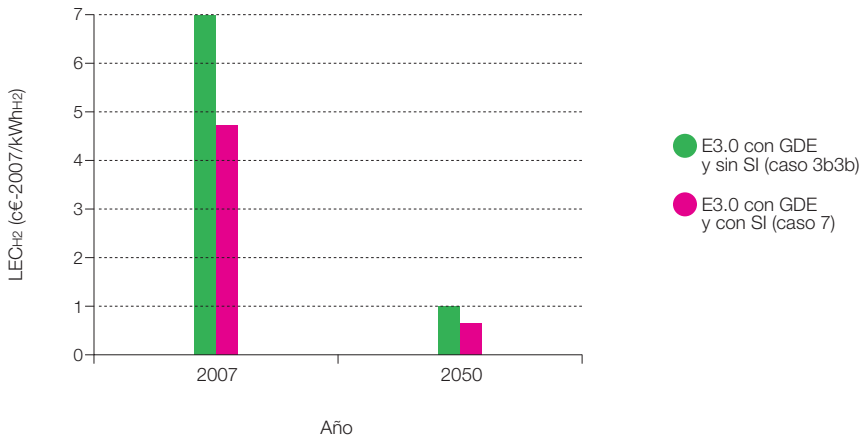
Por lo que respecta a los costes de generación de electricidad de este caso son análogos a los del caso anterior, pues la integración de la gestión de la acumulación no tiene repercusiones sobre el sistema de generación eléctrica.

Figura 742. Comparación entre las potencias requeridas para generación de hidrógeno en los casos-3b3b y caso-7, correspondientes a la cobertura de la demanda total del contexto E3.0 en el año 2050, con participación de la gestión de la demanda, y sin (caso-3b3b) o con (caso-7) integración de la capacidad de acumulación (SI: “storage integration”).



1.049 Elevados costes de inversión de los equipos para generación de hidrógeno.

Figura 743. Comparación entre los costes normalizados de generación de hidrógeno (sin incluir los costes del consumo de electricidad asociado) en los casos-3b3b y caso-7, correspondientes a la cobertura de la demanda total del contexto E3.0 en el año 2050, con participación de la gestión de la demanda, y sin (caso-3b3b) o con (caso-7) integración de la capacidad de acumulación (SI: “storage integration”).



5.6.3 Coste total del sistema energético

En este apartado presentamos los costes totales del sistema energético en el contexto E3.0. Para ello, a los costes de generación eléctrica recogidos en los apartados anteriores les hemos añadido las otras contribuciones (generación y acumulación de hidrógeno, biomasa, solar térmica, etc.) para obtener el coste total del sistema energético. En términos específicos (LEC), están referidos al consumo de energía total, y representan el promedio de todo el sistema energético. Al igual que en todos los casos anteriores, se trata de costes normalizados, expresados en ¢€-2007.

Por lo que se refiere a los costes de almacenamiento de hidrógeno, tal y como comentamos anteriormente, por lo general, no los retendremos al establecer comparaciones con el caso BAU, puesto que para el BAU

tampoco se han incluido los costes correspondientes al almacenamiento de los combustibles fósiles. Sin embargo, puesto que la transición al contexto E3.0 (o a la cobertura 100% renovable en el contexto BAU) requiere el despliegue de la infraestructura de acumulación de hidrógeno, presentaremos también resultados de los costes totales incluyendo el efecto de este componente.

En las figuras 744 y 745 recogemos la estructura del sistema energético, en términos de energía final y de energía primaria para el contexto E3.0 en el año 2050, como referencia para analizar la estructura de costes.

Figura 744. Estructura de la demanda de energía final en el contexto E3.0 para el año 2050.

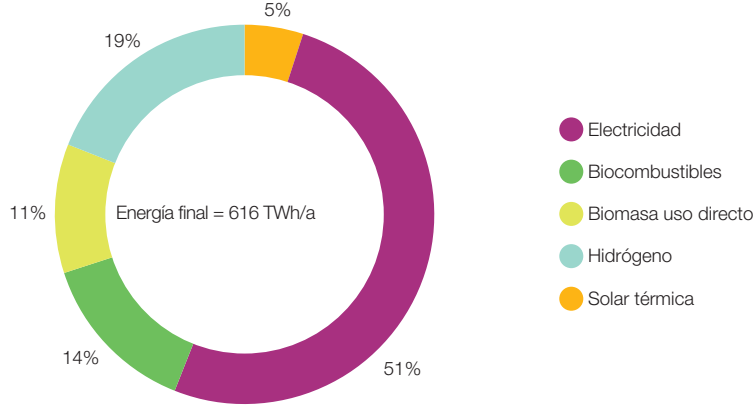
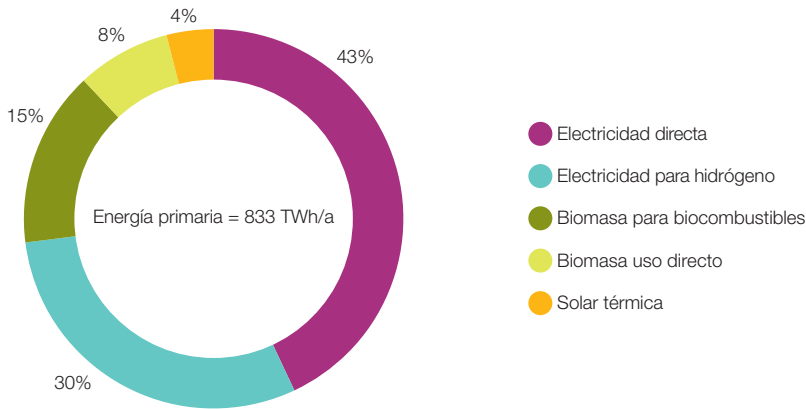


Figura 745. Estructura de la demanda de energía primaria en el contexto E3.0 para el año 2050.



Las figuras 746 y 747 recogen los resultados, en términos de coste específico y coste total para el conjunto del sistema energético, en el contexto E3.0 y sin participación de la gestión de la demanda. Se presentan resultados con y sin tener en cuenta la contribución de los costes de acumulación de hidrógeno. Al igual que en el caso BAU, con 100% de cobertura renovable,

vemos cómo la repercusión de la acumulación de hidrógeno es relativamente más importante en el año 2007 que en 2050. Por otro lado, y comparando con el caso BAU, en el contexto E3.0 el peso relativo de la demanda de hidrógeno es inferior, por lo que la repercusión relativa de los costes asociados al hidrógeno sobre el coste total es menor.

Figura 746. Costes específicos del conjunto del sistema energético, referidos a la demanda de energía final total, para el contexto E3.0 sin participación de la gestión de la demanda, y para los casos de incluir o no el efecto del coste de la acumulación de hidrógeno.

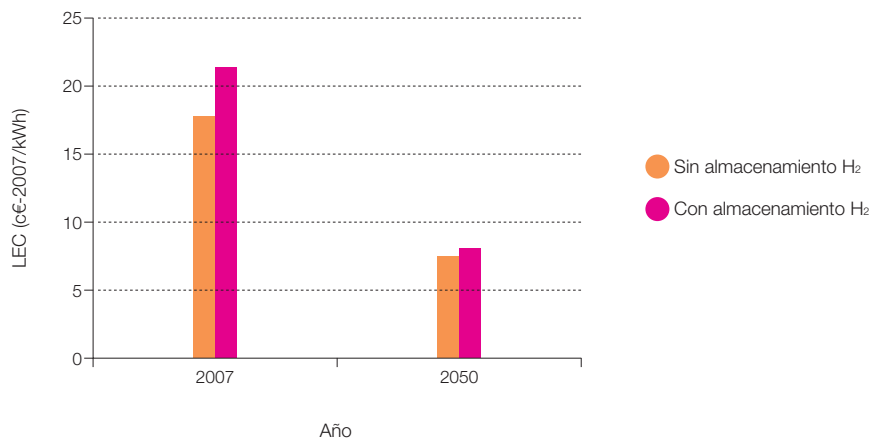


Figura 747. Costes totales del conjunto del sistema energético, referidos a la demanda de energía final total, para el contexto E3.0 sin participación de la gestión de la demanda, y para los casos de incluir o no el efecto del coste de la acumulación de hidrógeno.

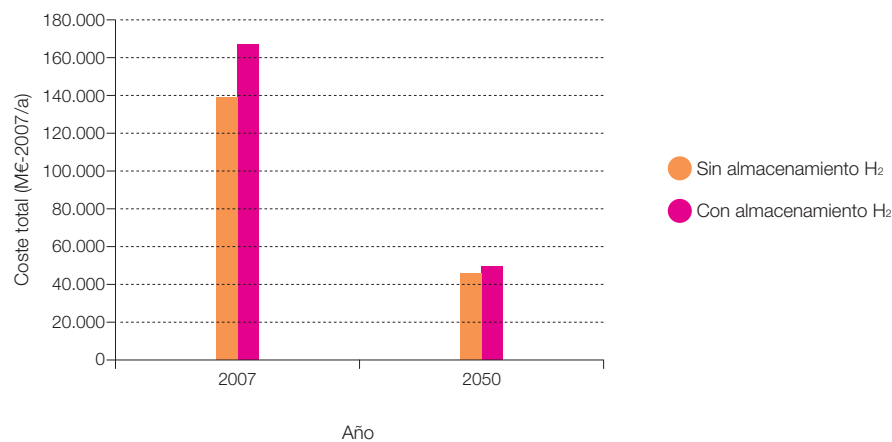


Figura 748. Costes específicos del conjunto del sistema energético, referidos a la demanda de energía final total, para el contexto E3.0 con participación de la gestión de la demanda, y para los casos de incluir o no el efecto del coste de la acumulación de hidrógeno.

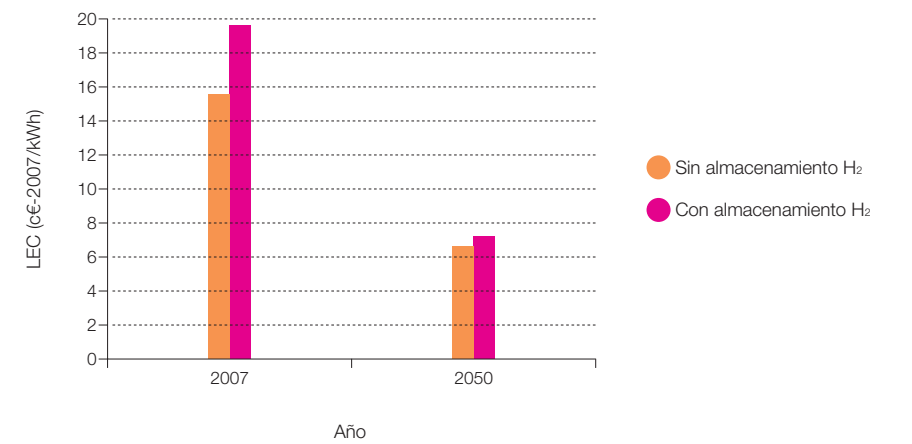


Figura 749. Costes totales del conjunto del sistema energético, referidos a la demanda de energía final total, para el contexto E3.0 con participación de la gestión de la demanda, y para los casos de incluir o no el efecto del coste de la acumulación de hidrógeno.



Las figuras 748 y 749 recogen los resultados, en términos de coste específico y coste total para el conjunto del sistema energético, en el contexto E3.0 y con participación de la gestión de la demanda. Se presentan resultados con y sin tener en cuenta la contribución de los costes de acumulación de hidrógeno.

De cara a mostrar los pesos relativos de los distintos componentes sobre el LEC total del sistema energético, las figuras 750 y 751 presentan los resultados para el contexto E3.0 con gestión de la demanda, y sin (caso-3b3b) o con (caso-7) la integración de la gestión de la acumulación de los subsistemas

eléctrico e hidrógeno. El término “total excepto H₂” recoge las contribuciones de todos los otros elementos del sistema energético aparte de la generación y acumulación

de hidrógeno, y a pesar de que está dominado por la generación de electricidad, también tiene contribuciones de la biomasa y la solar térmica.

Figura 750. Estructura de los LEC para la cobertura total de la demanda, en el contexto E3.0 con participación de la demanda, pero sin integración de la gestión de la acumulación (SI) de los subsistemas eléctrico e hidrógeno.

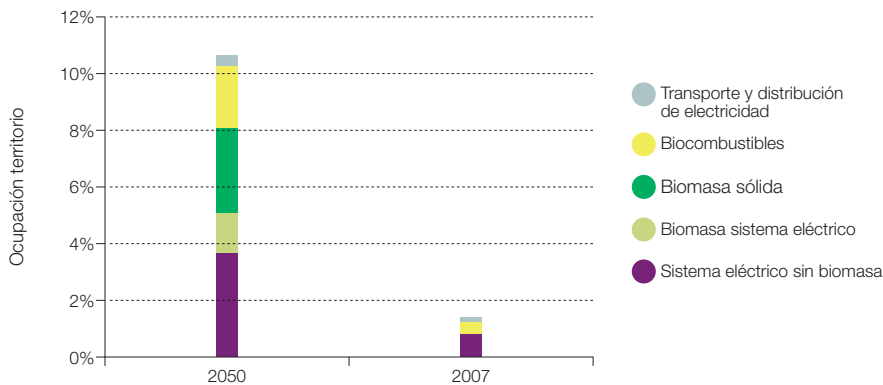
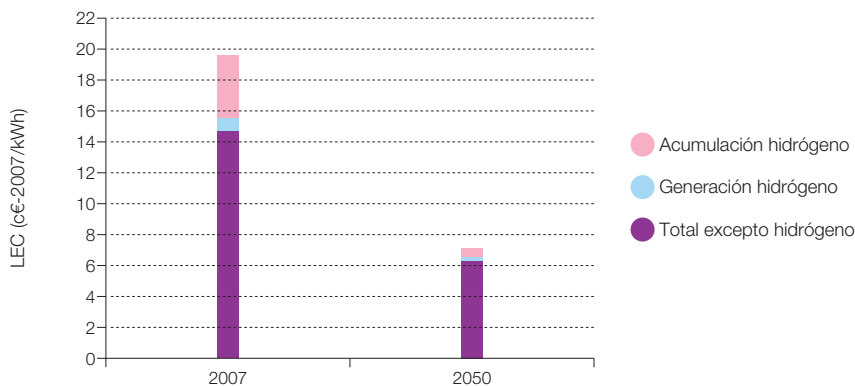


Figura 751. Estructura de los LEC para la cobertura total de la demanda, en el contexto E3.0 con participación de la demanda, y con integración de la gestión de la acumulación (SI) de los subsistemas eléctrico e hidrógeno.



En las figuras 752 y 753 recogemos la comparativa en términos de LEC y de coste total de los principales casos analizados, tanto para el contexto BAU como para el E3.0.

En términos de LEC, los dos casos del contexto E3.0 resultan más favorables que el BAU con 100% de renovables, debido a que la estructura de la demanda resultante en el contexto E3.0 permite una cobertura más económica^{1.050} con energías renovables que lo que sucedía en el caso BAU. Dentro del contexto E3.0, la incorporación de la gestión de la demanda también proporciona una mejora en el LEC, debida tanto a un mejor acoplamiento de la demanda con la generación, como a un requerimiento reducido de capacidad de regulación por el lado de la oferta^{1.051}.

Es preciso hacer un par de comentarios a sobre estos resultados:

- En principio, al hacer el sistema más eficiente y flexible, no tendría por qué producirse una reducción del coste específico (LEC), aunque sí que esperaríamos una reducción del coste total. El hecho de que en este caso, al pasar al contexto E3.0 obteníamos LEC inferiores, es en parte una consecuencia del mejor acoplamiento entre generación y demanda, que nos proporciona un beneficio adicional.
- Los costes asociados al despliegue de eficiencia e inteligencia no están contemplados dentro del LEC del contexto E3.0. Si bien, tal y como comentamos anteriormente, hay elementos de eficiencia cuyo despliegue conlleva un coste incremental nulo o incluso negativo, hay otros que tienen un coste asociado. En este estudio no hemos entrado a valorar estos costes adicionales^{1.052} correspondientes al contexto E3.0, y en cambio, hemos adoptado la

aproximación inversa de definir el sobre coste máximo que estos costes pueden suponer como diferencia entre los del contexto BAU y los del contexto E3.0.

Con todo, en el año 2007 los LEC del contexto E3.0 siguen siendo superiores al LEC del contexto BAU con mix de generación BAU, pero en el año 2050 resultan muy inferiores, de tal forma que la media en el periodo considerado, resulta favorable para el contexto E3.0, y mejora la ventaja a medida que incrementamos el instante final más allá del año 2050.

Por lo que se refiere al coste total del sistema energético, que realmente es el parámetro relevante para realizar la comparativa entre los contextos BAU y E3.0, la figura 753 nos muestra cómo se amplifican las ventajas del contexto E3.0 respecto al BAU. Ya en el año 2007, el coste total del contexto E3.0 es igual o inferior al coste total del BAU con mix de generación BAU, recuperando esa desventaja que tenía el uso de energías renovables en el contexto BAU para el año 2007. En el año 2050, la diferencia de costes entre el contexto BAU y el E3.0 resulta abismal^{1.053}, y deja un margen muy grande de recursos económicos para articular el despliegue de medidas de eficiencia e inteligencia por el sistema económico, al mismo tiempo que proporciona una estabilidad de costes, al independizarse de las tendencias inflacionistas asociadas al uso de combustibles fósiles o nucleares. El uso inteligente de estos recursos liberados es lo que define una economía sostenible, y requiere la articulación de las condiciones adecuadas para establecer los mecanismos de economía inteligente que permitan al sistema económico alinearse con los requerimientos de sostenibilidad y tomar las riendas de este proceso de transición^{1.054}.

1.050 Esto se refleja tanto en los menores múltiplos solares requeridos por el mejor acoplamiento entre demanda y generación, y al menor peso relativo del hidrógeno en la cobertura de la demanda de energía final.

1.051 En concreto no se requiere el uso de la hibridación termosolar.

1.052 Es preciso recalcar que la evaluación de estos costes es compleja por las múltiples dimensiones que tiene asociadas. En efecto, más allá de los costes directos asociados al despliegue de eficiencia e inteligencia, este incremento de costes incluye los recursos económicos para articular un sistema económico inteligente. En efecto, el margen de beneficios necesario para la existencia de las empresas de servicios energéticos y agregadores de la demanda que permitan articular el despliegue de eficiencia e inteligencia, estarían incluidos en este coste incremental, pero al mismo tiempo, estos recursos económicos proporcionan beneficios adicionales al establecer las bases de un sistema económico sostenible e inteligente.

1.053 El coste total del contexto E3.0 en el año 2050 es incluso muy inferior al coste total del BAU con mix BAU en el año 2007.

1.054 Elementos como establecer las condiciones necesarias para que las empresas de servicios energéticos enfoquen su actividad al suministro de servicios, desvinculándolo del suministro de energía, o las señales de mercado y condiciones regulatorias para crear el nicho de mercado necesario para los agregadores de la demanda, así como el despliegue de inteligencia por las redes de suministro de servicios (energéticos y de movilidad), constituyen ejemplos del uso inteligente de esos recursos económicos liberados para la activación del cambio desde el lado de la demanda. Pero elementos como un sistema estable e inteligente de primas para facilitar la introducción de energías renovables en el sistema, constituyen otro componente.

Figura 752. Comparación de los LEC del conjunto del sistema energético para los principales casos analizados en el contexto BAU y en el contexto E3.0.

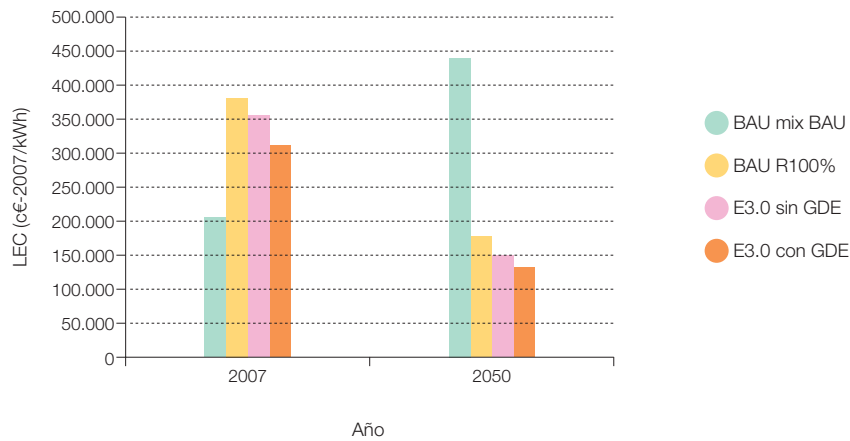
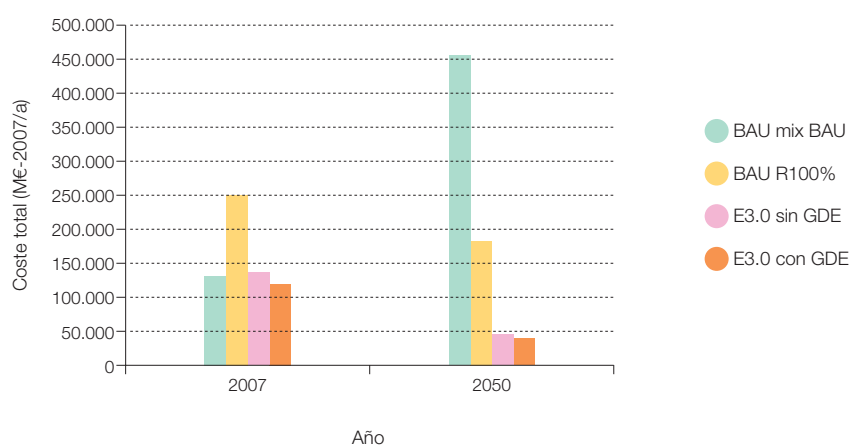


Figura 753. Comparación de los costes totales del conjunto del sistema energético para los principales casos analizados en el contexto BAU y en el contexto E3.0.



Podemos obtener una primera aproximación de los recursos económicos liberados para desarrollar el gran potencial de ahorro asociado al contexto E3.0, al dividir el ahorro en costes entre el contexto^{1.055} BAU y el E3.0 (año 2050) por el ahorro de energía conse-

guido. El resultado es de 28,5 c€/2007/kWh ahorrado, que por tanto nos proporciona una cota superior de los recursos para articular todos los mecanismos de eficiencia e inteligencia que permitan desarrollar este potencial de ahorro.

1.055 Para el contexto BAU hemos tomado el caso de cobertura de la demanda con un mix BAU, y para el contexto E3.0 hemos considerado el caso E3.0 con GDE.

5.6.4 Evolución temporal de costes

En este apartado vamos a recoger el análisis de la evolución temporal de costes en el periodo considerado para los análisis realizados en el contexto E3.0, así como la comparativa con los resultados obtenidos para el contexto BAU.

En las figuras 754 a 757 mostramos la evolución temporal en el periodo de tiempo considerado del coste específico del conjunto del sistema energético, asociado a la nueva capacidad instalada en un año determinado (LEC), al promedio del mix de generación existente en un año determinado (LEC_m) y al promedio del sistema en todo el periodo considerado ($LEC_{promedio}$). Observamos las mismas tendencias que discutimos en el caso del contexto BAU con generación 100% renovable, pero con los niveles de costes menores correspondientes al contexto E3.0.

Figura 754. Evolución temporal de los costes específicos normalizados en el periodo de tiempo considerado, de la nueva capacidad instalada en un año determinado (LEC), del promedio del parque existente en un año determinado (LEC_m), y el promedio del sistema a lo largo de todo el periodo considerado ($LEC_{promedio}$). Contexto E3.0 sin participación de la gestión de la demanda y sin tener en cuenta los costes asociados al almacenamiento de hidrógeno.

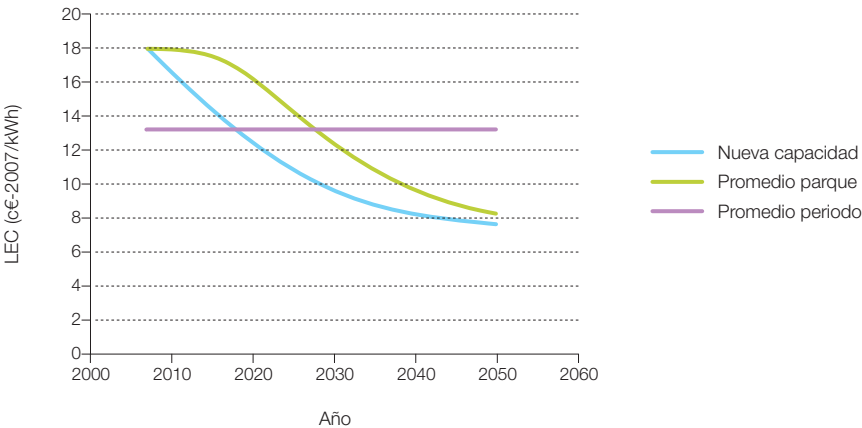


Figura 755. Evolución temporal de los costes específicos normalizados en el periodo de tiempo considerado, de la nueva capacidad instalada en un año determinado (LEC), del promedio del parque existente en un año determinado (LEC_m), y el promedio del sistema a lo largo de todo el periodo considerado ($LEC_{promedio}$). Contexto E3.0 sin participación de la gestión de la demanda y teniendo en cuenta los costes asociados al almacenamiento de hidrógeno.

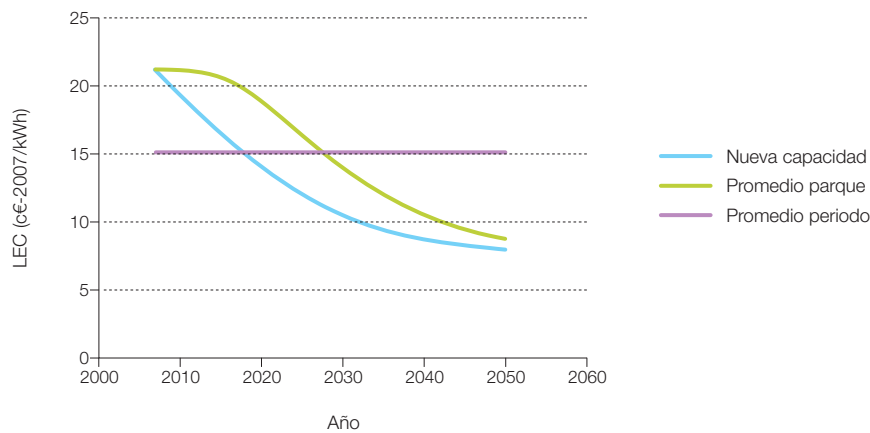


Figura 756. Evolución temporal de los costes específicos normalizados en el periodo de tiempo considerado, de la nueva capacidad instalada en un año determinado (LEC), del promedio del parque existente en un año determinado (LEC_m), y el promedio del sistema a lo largo de todo el periodo considerado ($LEC_{promedio}$). Contexto E3.0 con participación de la gestión de la demanda y sin tener en cuenta los costes asociados al almacenamiento de hidrógeno.

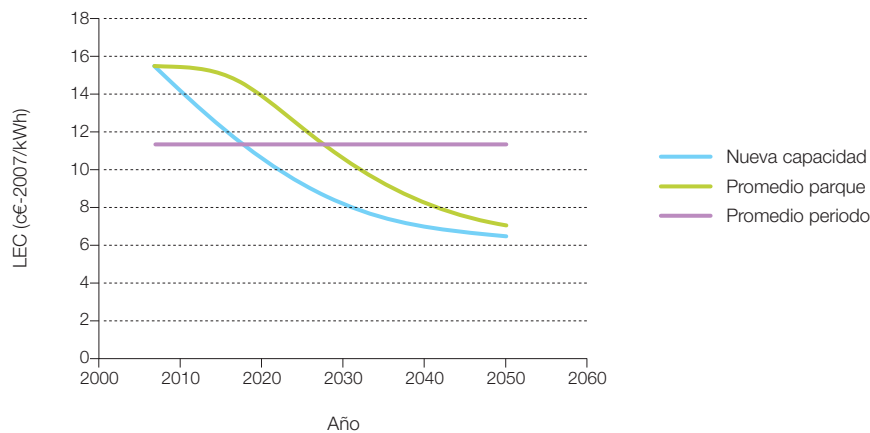


Figura 757. Evolución temporal de los costes específicos normalizados en el periodo de tiempo considerado, de la nueva capacidad instalada en un año determinado (LEC), del promedio del parque existente en un año determinado (LEC_m), y el promedio del sistema a lo largo de todo el periodo considerado ($LEC_{promedio}$). Contexto E3.0 con participación de la gestión de la demanda y teniendo en cuenta los costes asociados al almacenamiento de hidrógeno.

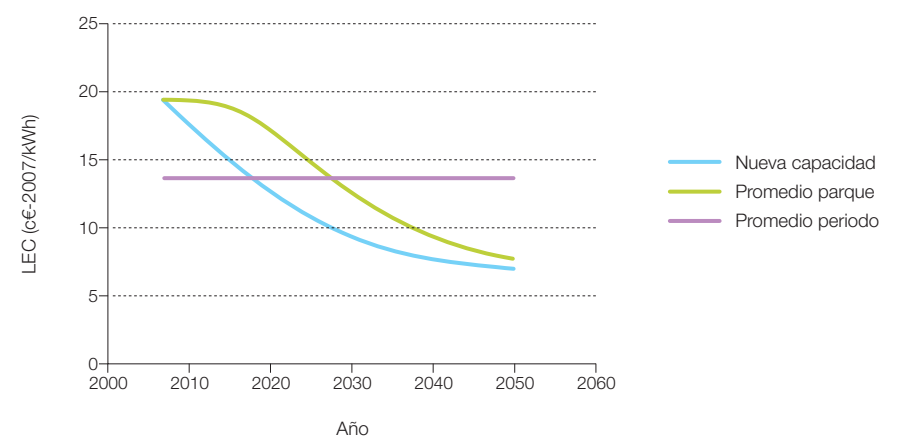
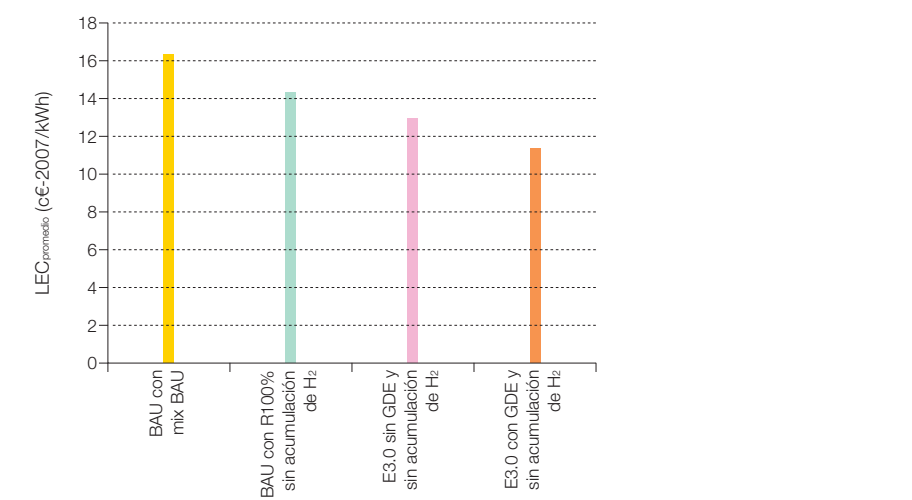


Figura 758. Comparación de los $LEC_{promedio}$ en el periodo 2007-2050 de los principales casos considerados para el contexto BAU y el E3.0, sin tener en cuenta el efecto de la infraestructura de acumulación de combustibles.



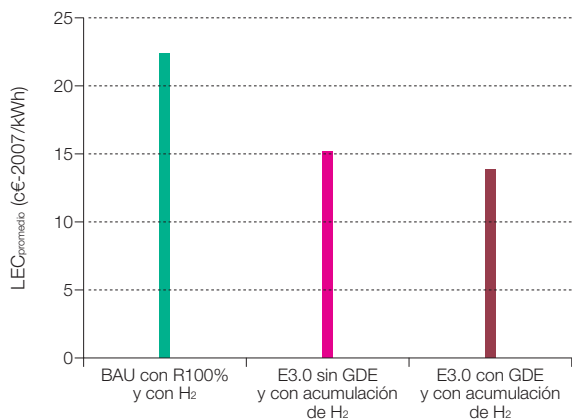
En la figura 758 presentamos una comparación directa entre los $LEC_{promedio}$ en el periodo 2007-2050 de los principales casos analizados, tanto para el contexto BAU como para el E3.0, sin incluir el efecto de la acumulación de hidrógeno, mientras que en la figura 759 mostramos los resultados incluido el efecto de la acumulación de hidrógeno^{1.056}. Como podemos observar, los $LEC_{promedio}$ para el contexto E3.0, incluso considerando el efecto de la acumulación de hidrógeno, son inferiores al del contexto BAU con mix BAU. Pero es más, tal y como ya hemos comentado anteriormente, al aumentar el periodo de análisis más allá del año 2050, la diferencia entre los $LEC_{promedio}$ del contexto BAU y del E3.0 va aumentando, y tiende a la diferencia entre los LEC en el año 2050.

La figura 760 recoge la comparativa entre la evolución temporal de los LEC_m (promedios del parque existente en cada año) para los

principales casos analizados, tanto del contexto BAU como del E3.0. En esta figura podemos apreciar el gran beneficio (incluso a nivel de LEC) que nos deja la transición hacia el contexto E3.0 a partir del año 2050. Sin embargo, la diferencia en costes absolutos será muy superior a la mostrada para los LEC_m en esta figura, en la que el BAU con 100% renovables aparece bastante cercano al E3.0.

Si cruzamos estos resultados con los de los escenarios temporales anteriormente presentados, de evolución de la demanda de energía en los contextos BAU y E3.0, es posible obtener una cuantificación de la evolución total de los costes^{1.057} del sistema energético a lo largo del periodo de análisis. La figura 761 nos muestra estos resultados para los principales casos analizados en los contextos BAU y E3.0. En esta figura podemos apreciar el gran beneficio remanente a partir del año 2050 que

Figura 759. Comparación de los $LEC_{promedio}$ en el periodo 2007-2050 de los principales casos considerados para el contexto BAU y el E3.0, incluido el efecto de la infraestructura de acumulación de hidrógeno.



1.056 El caso BAU con mix BAU no aparece en esta figura por no tener valorado el coste de la infraestructura para acumular combustibles fósiles.

1.057 Conviene recordar que se trata de los costes normalizados correspondientes al parque existente en cada año.

nos deja como herencia la transición desde un contexto BAU a uno E3.0. Al comparar el BAU con generación 100% renovables con los casos del contexto E3.0, apreciamos la gran diferencia en coste total (del orden de 1/4) asociado al despliegue de eficiencia e inteligencia.

Las figuras 762 y 763 muestran el valor promedio en el periodo 2007-2050 del coste anual total del sistema energético, y del ahorro promedio respecto al caso BAU con mix BAU. Estos ahorros, incluso en el periodo 2007-2050 asociado al despliegue del contexto E3.0, alcanzan valores muy elevados

Figura 760. Comparación de la evolución temporal de los LEC_m (promedios del parque existente en cada año) para los distintos casos considerados.

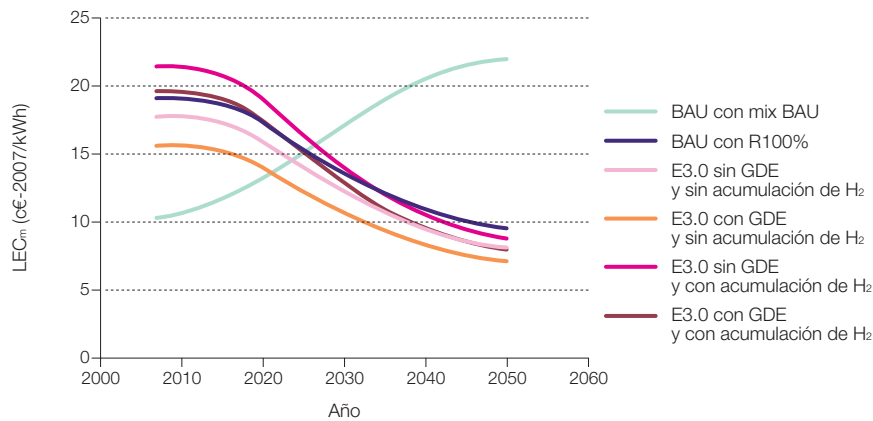
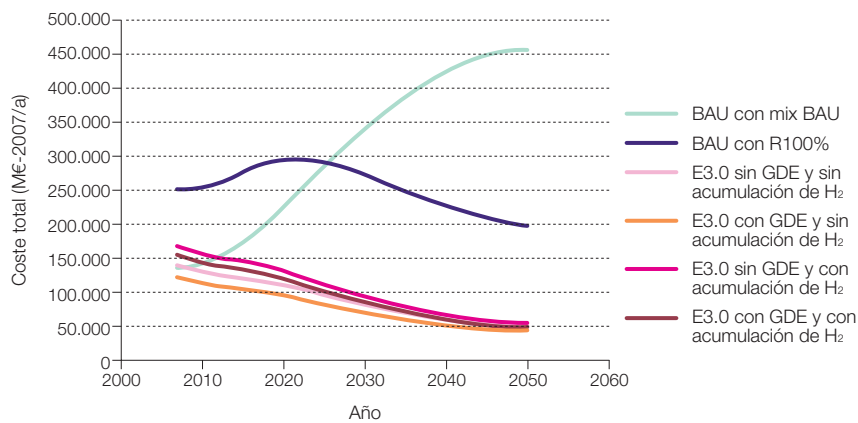


Figura 761. Evolución temporal en el periodo considerado de los costes normalizados totales correspondientes al sistema energético existente en cada año.



que nos proporcionan un recurso económico muy importante para articular la transición del sistema energético. A partir del año 2050, una vez completada la transición, los niveles de ahorro asociados al año 2050 (muy superiores a los promedios recogidos en estas figuras), permanecen de forma indefinida, y repercuten íntegramente en una mejora de la eficiencia de nuestro sistema económico.

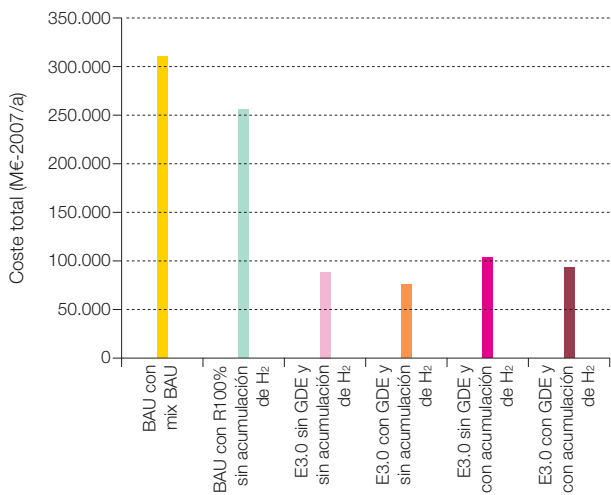
Resulta interesante comparar estos ahorros anuales promedio en el periodo 2007-2050, con los costes de las primas asociadas al mecanismo de apoyo a las energías renovables en el año 2009. Estos ahorros se extienden a todo el periodo 2007-2050, e incluso se incrementan a partir del año 2050, mientras que las primas a las energías renovables, como mecanismo inteligente de articulación del cambio de modelo energético, tan solo existen durante un periodo de tiempo inicial asociado al acompañamiento de estas tecnologías en las primeras etapas de su curva de

aprendizaje: en el caso del RD661/2007 que regía la gran mayoría de las primas en el año 2009, la retribución se prolonga un promedio^{1.058} de 20 años. La figura 764 nos muestra estos resultados, que para el caso del contexto E3.0 sitúa en torno a un 1% el peso relativo de las primas del año 2009 respecto al ahorro promedio en el periodo 2007-2050.

Otro indicador que tiene interés evaluar son los costes disponibles para desarrollar la transición sin incurrir en un incremento de costes totales del sistema energético, que representen una cota superior de los gastos a realizar para apoyar la transición desde el contexto BAU al E3.0 sin que llegue a suponer un sobrecoste neto.

Evidentemente, aunque la transición desde el contexto BAU al E3.0 representara un incremento de coste total para el sistema energético, esta transición debería desarrollarse para mantener nuestra sociedad y sus sistemas

Figura 762. Promedio en el periodo 2007-2050 del coste anual total normalizado del sistema energético.



1.058 Varía entre las distintas tecnologías: 25 años para las solares, 20 años para la eólica, geotérmica, olas y marea, y 15 años para la biomasa.

Figura 763. Promedio en el periodo 2007-2050 del ahorro anual normalizado de los distintos casos respecto al BAU con mix BAU.

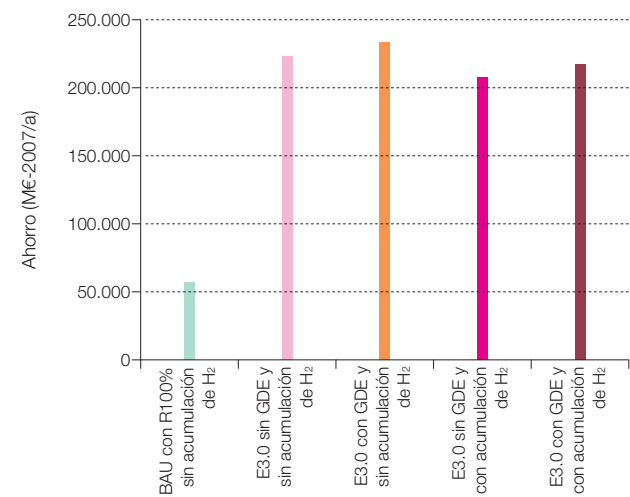
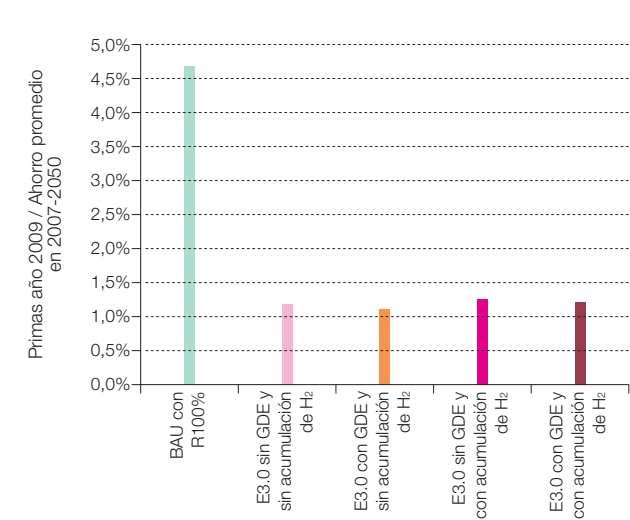


Figura 764. Valor relativo de las primas destinadas a la promoción de las energías renovables en el año 2009, respecto al ahorro anual promedio en el periodo 2007-2050 de cada uno de los casos indicados respecto al BAU con mix BAU.



dentro de las condiciones de contorno del medio en que se desarrollan. Entre estas condiciones de contorno podemos mencionar la estabilidad del sistema climático, la disponibilidad de recursos para el sistema energético, y el acceso al conjunto de la población (presente y futura) de estos recursos, es decir, la sostenibilidad. Por tanto, si la transición al contexto E3.0 supusiera un sobre coste para el sistema energético, este sobre coste no sería otra cosa que la valoración de las externalidades que no estaba contemplando la estructura de costes con la que evaluábamos el impacto económico del sistema energético. Y evidentemente, estas externalidades, en el marco de un desarrollo sostenible no quedaría otro remedio que internalizarlas, y por tanto que desarrollar la transición desde el contexto BAU al E3.0.

Además, el llevar a cabo la transición desde el contexto BAU al E3.0 nos supone un ahorro muy importante para el sistema económico. En este contexto resulta interesante preguntarse cuál es el máximo coste del proceso de transición, que nos mantendría con unos costes totales del sistema energético por debajo de los correspondientes a mantenernos en el contexto BAU: no es que no se pueda sobrepasar este sobre coste, si es que es preciso para articular la transición desde el BAU al E3.0, pero de cualquier forma resulta un indicador interesante con el que comparar tanto los gastos asociados a promover los cambios que nos permitan evolucionar desde un contexto BAU al E3.0.

Y considerando ese proceso de transición desde el contexto BAU al E3.0 hay dos elementos diferenciados que podríamos distinguir: uno de ellos es la sustitución del sistema de generación por uno basado al 100% en energías renovables, y el otro es el despliegue de eficiencia por el sistema energético

(quedando la articulación de inteligencia como un elemento transversal a estos dos). Por tanto, aparte de presentar algún resultado correspondiente al proceso total (renovables y eficiencia), vamos a presentar indicadores que proporcionen una aproximación a ambos elementos característicos del contexto E3.0 por separado.

Puesto que el coste promedio claramente depende del periodo para promediar, vamos a proporcionar estos indicadores para dos situaciones distintas:

- El promedio en el periodo 2007-2050 en que se desarrolla la transición
- El valor correspondiente al mix promedio existente en el año 2050, que representa una cota conservadora del valor asociado a extender el periodo de promediado más allá^{1.059} del año 2050.

Vamos a empezar por presentar los sobre costes máximos asociados al conjunto de la transición desde el contexto BAU al E3.0, disponible para implementar esta transición sin incurrir en un incremento de costes del sistema energético respecto a mantenernos en el contexto BAU. La figura 765 recoge este resultado en términos del ahorro conseguido.

Aunque los resultados de la figura anterior ya son bastante llamativos, hay que tener en cuenta que el ahorro conseguido no representa el mejor indicador para representar el conjunto del proceso de transición. El valor de la demanda total de energía en el contexto hacia el que queremos evolucionar (E3.0) representa un parámetro más adecuado para evaluar este indicador. La figura 766 nos reproduce los resultados. Como podemos ver en esta figura, la cota superior del sobre coste en el que podríamos incurrir para materializar

1.059 Debe tenerse en cuenta que los beneficios de la transición permanecen indefinidamente, motivo por el cual no resulta justo limitar el promediado al periodo 2007-2050, lo cual es equivalente a no reconocer esos beneficios que permanecen en el futuro más allá del año 2050.

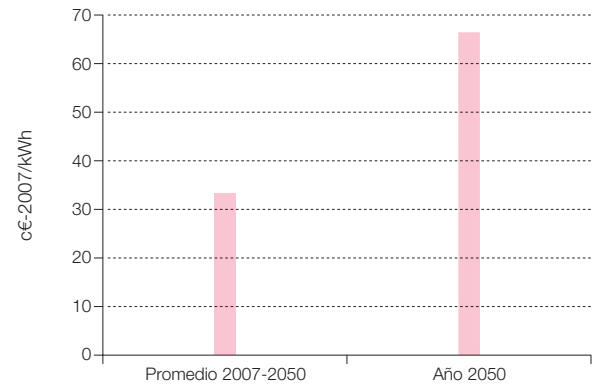
el proceso de transición, sin incurrir en un incremento de costes respecto al contexto BAU, es realmente muy elevado, especialmente si extendemos el periodo de promedio más allá del año 2050 para reconocer los beneficios permanentes que nos deja esta

transición. Con estos valores tan elevados, es evidente que deberíamos ser capaces de materializar la transición y mantener unos costes totales del sistema energético inferiores a los que hubieran correspondido de mantenernos dentro del contexto BAU, incluso si limitamos

Figura 765. Sobrecoste máximo disponible para que la transición no represente un coste adicional en el sistema energético respecto al BAU, por unidad de ahorro conseguido.



Figura 766. Sobrecoste máximo disponible para que la transición no represente un coste adicional en el sistema energético respecto al BAU, por unidad de energía final demandada en el contexto E3.0.



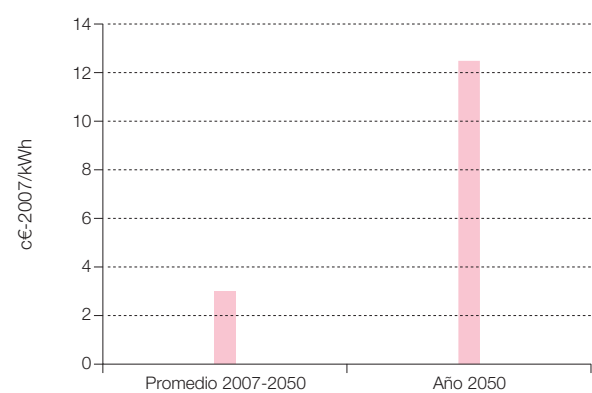
el periodo de promediado al periodo correspondiente a desarrollar la transición (2007-2050), por lo que nuestro sistema económico se va a ver muy favorecido^{1.060} si desarrollamos la transición desde el BAU al E3.0.

Analicemos ahora cada uno de las dos componentes principales por separado, empezando por la introducción de un mix 100% renovable. En la figura 767 recogemos el valor del sobrecoste máximo disponible para sustituir el mix BAU por un mix 100% renovable, bajo el contexto de demanda BAU, y de tal forma que el coste total del sistema no crezca por encima del que tendría si siguiéramos la trayectoria BAU. Como podemos ver, si limitamos el periodo de promediado al 2007-2050 este sobrecoste es aparentemente relativamente bajo (3,0 c€/2007/kWh), y si extendemos el periodo de promediado más allá de 2050 para reconocer los beneficios permanentes que nos deja la transición, este sobrecoste asciende a 12,5 c€/2007/kWh. Estos valores están referidos a desarrollar la transición en un contexto de demanda BAU.

Si evaluamos estos sobrecostes en un contexto de demanda E3.0, los resultados son los presentados en la figura 768, que nos muestran un incremento de estos sobrecostes hasta los 4,6 c€/2007/kWh al limitar el promediado al periodo 2007-2050, y 14,9 c€/2007/kWh al extender el periodo de promediado más allá del año 2050.

Para interpretar correctamente estos resultados, hay que tener en cuenta que se extienden a todo el periodo de promediado considerado, y por tanto, en caso de querer compararlos con otros valores con las mismas unidades, pero en un periodo de vida menor, habría que afectarlos del cociente de los periodos de tiempo considerados. Este es el caso, por ejemplo, de los mecanismos de apoyo para el avance de las tecnologías por su curva de aprendizaje, como puede ser el sistema de primas a las energías renovables. Estas primas no perduran en el tiempo, sino que tienen un plazo de vida finito para la instalación a la que se le concede, y se reducen en el tiempo^{1.061} hasta desaparecer en

Figura 767. Sobrecoste máximo disponible para que la sustitución del mix BAU por uno 100% renovable no represente un coste adicional en el sistema energético respecto al BAU, por unidad de energía final demandada en el contexto BAU.



1.060 Recordemos que además de estos beneficios asociados a la reducción de costes, están los beneficios económicos asociados a la generación de empleo y a la articulación de una economía sostenible.

1.061 Mediante un proceso de acompañamiento inteligente para mantener la progresión de la tecnología por la curva de aprendizaje.

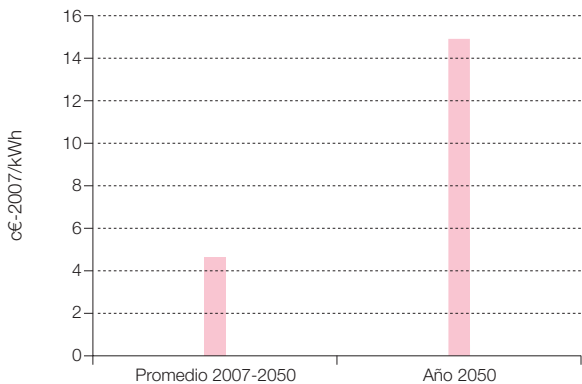
las centrales construidas los años siguientes. Consideremos, por ejemplo, una prima^{1.062} de 25 c€/kWh que se mantiene durante 25 años. Puesto que después de la vida útil de esta instalación (superior a los 25 años), la tecnología ya habrá avanzado suficientemente por su curva de aprendizaje para no requerir el apoyo de las primas, si empleamos, por ejemplo, un periodo de promediado de 100 años para reconocer los beneficios permanentes del cambio de modelo, y si la tecnología que está recibiendo este apoyo supone un 10% del parque generador, el peso de las primas será de $25 \times 25 / 100 \times 0,1 = 0,6$ c€/kWh, que es el valor a comparar con los 14,9 c€/2007/kWh correspondientes al sobrecoste máximo para no encarecer el sistema energético. Pero es más, el periodo de promediado se podría extender mucho más allá de los 100 años, pues el beneficio del cambio de sistema de generación se proyecta indefinidamente hacia el futuro, motivo por el que el sobrecoste de cualquier medida de apoyo temporal llega a hacerse despreciable respecto al sobrecoste máximo disponible.

Pasemos ahora a considerar la otra componente, la del despliegue de eficiencia energética. Los sobrecostes máximos asociados al despliegue de eficiencia por el sistema energético, son los que deberíamos comparar con los valores del coste del ahorro (coste del negavatio), correspondiente a las distintas medidas de eficiencia que hemos presentado y comentado en puntos anteriores.

La figura 769 recoge, para el caso de un sistema de generación 100% renovable, la evaluación de los sobrecostes máximos del despliegue de medidas de eficiencia para que el coste total del sistema energético se mantenga por debajo del que tendríamos si nos mantuviéramos en un contexto de demanda BAU. Como podemos apreciar, estos sobrecostes son significativamente más elevados que los costes del ahorro que evaluamos en el capítulo dedicado al sector edificación en el contexto E3.0.

Otro elemento curioso que apreciamos en esta figura es que el sobrecoste máximo se

Figura 768. Sobrecoste máximo disponible para que la sustitución del mix BAU por uno 100% renovable no represente un coste adicional en el sistema energético respecto al BAU, por unidad de energía final demandada en el contexto E3.0.



1.062 Del orden de las instalaciones fotovoltaicas tipo-II (suelo) en la convocatoria del primer trimestre de 2011.

reduce al incrementar el periodo de promediado. Este hecho es una consecuencia directa de que estamos considerando el sobre-coste del ahorro permitido en el caso de que el sistema de generación sea 100% renovable, es decir, estamos comparando por unidad de

ahorro energético conseguido, los costes del sistema con demanda BAU y generación 100% renovable, con el sistema con demanda E3.0 y generación 100% renovable. Debido al hecho de la gran reducción de costes de las renovables al avanzar en el tiempo,

Figura 769. Sobrecoste máximo disponible para que el despliegue de eficiencia energética no represente un coste adicional en el sistema energético respecto al BAU, con un mix de generación 100% renovable.

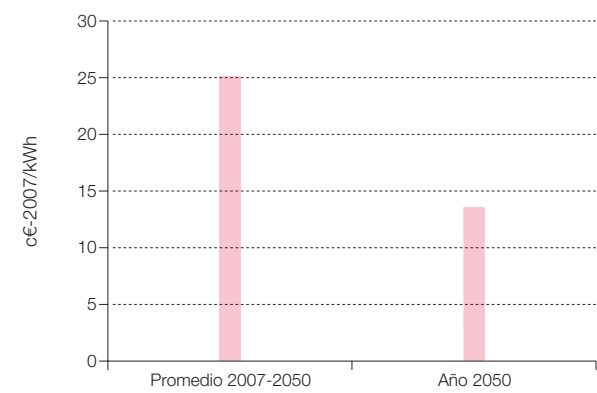
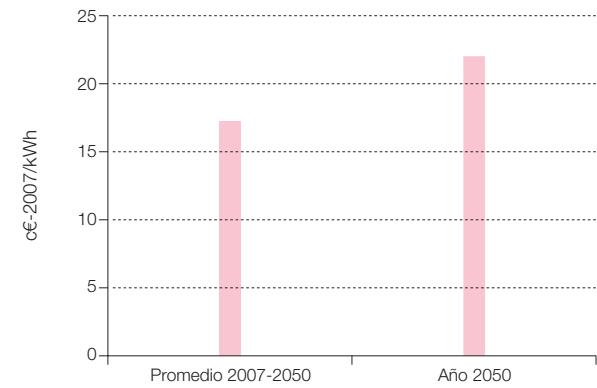


Figura 770. Sobrecoste máximo disponible para que el despliegue de eficiencia energética no represente un coste adicional en el sistema energético respecto al BAU, con un mix BAU de generación.



el ahorro económico crece más lentamente que el ahorro energético, por lo que el sobre coste permitido para el ahorro al promediar en periodos más allá del año 2050 es menor que el sobre coste correspondiente a promediar en el periodo 2007-2050 en el que se realiza la transición. Es decir, en el caso de que tengamos un mix de generación 100% renovable, el despliegue de eficiencia en el sistema resulta más favorable cuanto más pronto se lleve a término, debido a que en ese caso contrarresta los mayores costes de generación renovable.

Pero también tiene interés analizar los sobre costes máximos del despliegue de eficiencia en el caso de que permanezcamos en un contexto de mix BAU. La figura 770 nos presenta estos resultados, y muestra cómo ahora se invierte la situación anterior, incrementándose el sobre coste máximo del ahorro a medida de que aumentamos el periodo de promediado, lo cual es una consecuencia directa de la inflación incremental de los costes de la energía en un mix BAU de generación.

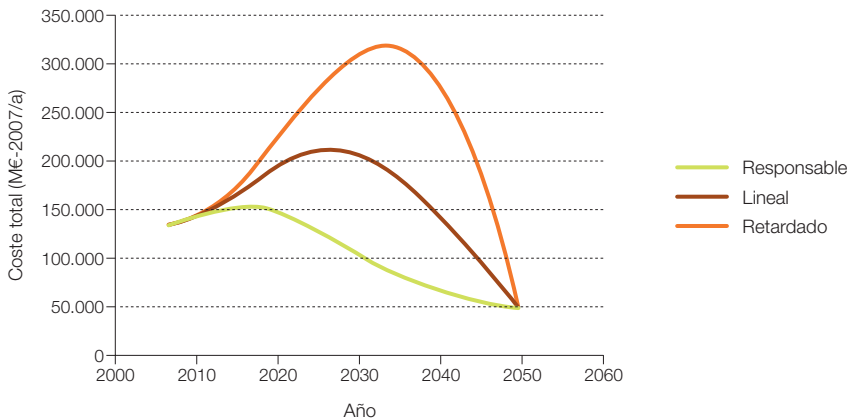
5.7 Escenarios de transición de costes

Por último, y siguiendo la metodología detallada en el desarrollo de los escenarios de demanda, presentamos en este punto las posibles trayectorias que podría seguir la transición desde el contexto BAU al contexto E3.0 en términos de costes.

Por tanto, si partimos del escenario BAU en el año 2007, aplicaremos distintos escenarios de transición entre las curvas que representan la evolución BAU y la E3.0 para evaluar el efecto de distintas políticas de transición. Como escenario E3.0, adoptaremos el escenario con participación de la gestión de demanda e incluiremos los costes correspondientes a la acumulación de hidrógeno.

La figura 771 recoge los resultados correspondientes a los tres escenarios de transición considerados: retardado, lineal y responsable. Como podemos ver, los retrasos

Figura 771. Distintos escenarios de transición del coste total del sistema energético desde el contexto BAU con mix BAU al contexto E3.0 con participación de gestión de la demanda e incluidos los costes de acumulación de hidrógeno.



en desarrollar el proceso de transición suponen unos importantes costes económicos.

La figura 772 recoge los costes anuales promedio en el periodo 2007-2050 del total del sistema energético asociado a cada una de las trayectorias de transición.

Resulta evidente que el adoptar transiciones más aceleradas hacia el contexto E3.0 nos aporta importantes beneficios económicos.

La figura 773 recoge los ahorros anuales promedio respecto a la trayectoria de transición retardada asociados a las trayectorias de transición lineal y responsable. La figura 774 nos muestra estos resultados en términos relativos al coste de las primas a las energías renovables en el año 2009.

Y mirándolo desde el punto de vista de los sobrecostes que nos supondrá el retrasar la transición desde el contexto BAU al contexto

Figura 772. Coste anual normalizado promedio durante el periodo 2007-2050 correspondiente a cada una de las trayectorias de transición desde el contexto BAU al E3.0.

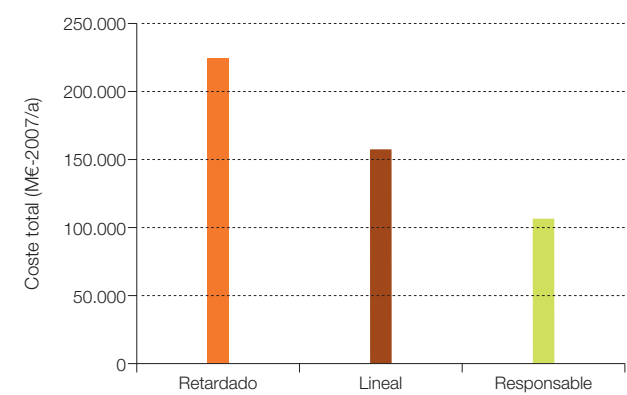
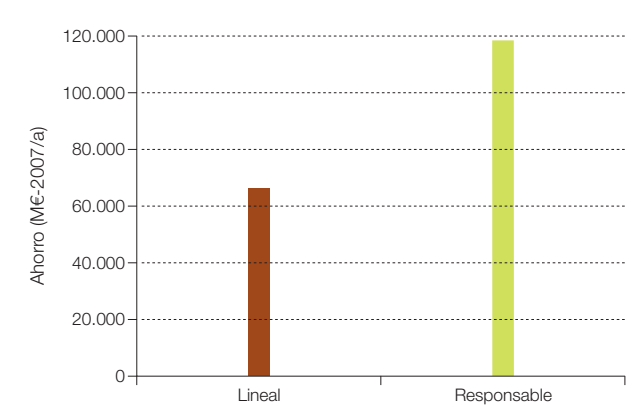


Figura 773. Ahorro anual promedio en el periodo 2007-2050 de las transiciones lineal y responsable respecto a la transición retardada.



E3.0, la figura 775 recoge el sobrecoste acumulado durante el periodo 2007-2050 correspondiente a seguir las trayectorias de transición lineal o retardada respecto a la trayectoria responsable.

Figura 774. Peso relativo de las primas a las energías renovables en el año 2009 respecto al ahorro asociado a acelerar la transición desde la trayectoria retardada a las trayectorias línea y responsable.

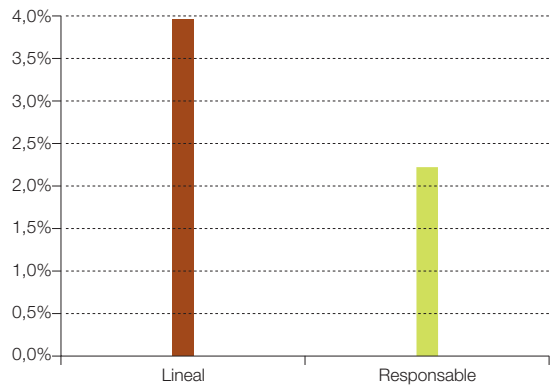
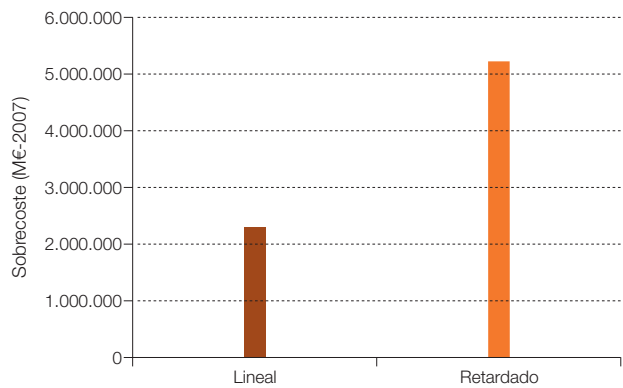


Figura 775. Sobrecoste acumulado durante el periodo 2007-2050 correspondiente a seguir las trayectorias de transición lineal o retardada respecto a la trayectoria responsable.



5.8 Ocupación del territorio

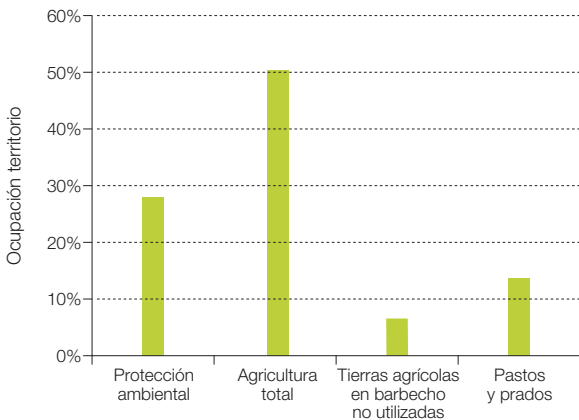
En este punto vamos a presentar la información relativa a las implicaciones en términos de ocupación del territorio de los distintos escenarios de cobertura de la demanda considerados^{1.063}, así como a comentar una serie de consideraciones relativas a este aspecto que proporcionen la perspectiva adecuada para analizar los resultados.

5.8.1 Elementos de contextualización sobre la ocupación del territorio

A modo de referencia, para ubicar mejor los resultados presentados, la figura 776 nos recoge la ocupación del territorio asociada a otros usos, como son la protección ambiental y la producción de alimentos. Por lo que respecta a los espacios con alguna figura de protección ambiental, tal y como se indica en

el estudio R2050 (GP, 2005), se han excluido total mente de la evaluación del potencial de las energías renovables y, por tanto, en ellos no se ha situado capacidad de generación alguna de los mix de generación considerados en el análisis de la cobertura de la demanda. Por lo que respecta a las tierras destinadas a la producción de alimento, que en su conjunto representan algo más del 50% de la superficie del territorio peninsular, también resulta una referencia adecuada puesto que junto a los usos del territorio para protección ambiental constituyen los usos que generan una mayor sensibilidad, al plantear un incremento de ocupación del territorio para el sistema energético. Dentro de las tierras destinadas a la producción de alimento, la figura 776 distingue por su relevancia de cara al análisis de la ocupación del territorio planteada para el sistema energético, las tierras agrícolas en barbecho o no utilizadas, y las tierras dedicadas a prados y pastos.

Figura 776. Ocupación del territorio, en términos relativos a la superficie peninsular española de los usos de protección ambiental y de producción de alimentos.



1.063 Las implicaciones en términos de ocupación del territorio de los distintos mix de generación analizados para la cobertura de la demanda eléctrica, y de hidrógeno, ya se anticiparon al presentar el análisis de cobertura de la demanda de estos mix de generación. Sin embargo, en este punto presentaremos esta información con un mayor grado de detalle, y la extendemos al conjunto del sistema energético.

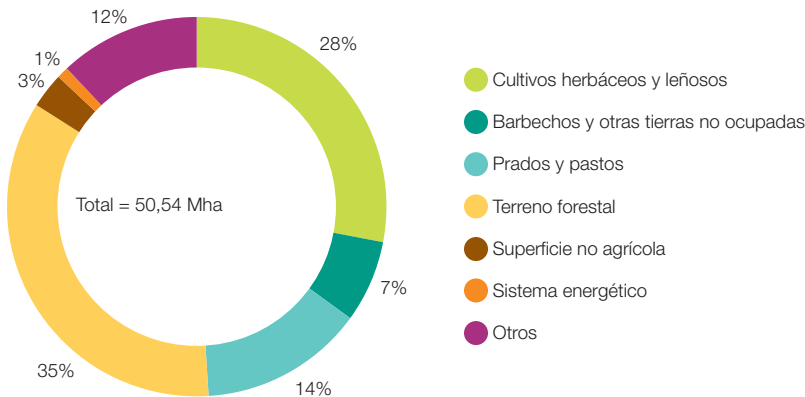
La figura 777 nos muestra la estructura actual del uso del territorio (Anuario estadístico 2009 del Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino) en España en el año 2008, donde hemos añadido una valoración del uso del territorio por parte del sistema energético en ese año.

Hasta hace poco tiempo, la ocupación del territorio por parte del sistema energético se encontraba por debajo del 1%, de tal forma que la infraestructura del sistema energético, y especialmente la correspondiente a la generación, pasaba desapercibida a la mayoría de la población. En los últimos años, y como consecuencia del incremento de la participación de las energías renovables en la producción de energía, ha empezado a aumentar la presencia del sistema de generación energética en el territorio, con parques eólicos, huertas fotovoltaicas y centrales termoeléctricas desplegándose por el territorio de la mayoría de las CCAA, de tal forma que la ocupación actual del territorio por el sistema energético es algo superior al 1%. En un contexto 100% renovable, la ocupación del territorio por parte del

sistema energético pasa a ser bastante superior a este valor, lo cual puede producir ciertas reticencias iniciales o críticas al despliegue de un sistema de generación renovable. Pero, ¿tienen estas críticas algún fundamento o razón de ser, más allá de la alteración del uso histórico del suelo? En este punto argumentaremos que no, y resulta perfectamente compatible con los otros usos requeridos del suelo para el funcionamiento de nuestra sociedad y el mantenimiento de nuestro medio natural, y en esencia, resulta una consecuencia del necesario y responsable proceso de internalización de los impactos de nuestro sistema energético actual.

En efecto, el hecho de que el sistema energético haya requerido hasta la fecha un uso aparentemente tan bajo del territorio, no es más que una consecuencia de la externalización de la mayoría de impactos de nuestro sistema energético, totalmente dependiente de unos combustibles fósiles procedentes de explotaciones energéticas en otros países, y cuya utilización genera una serie de impactos en el medio ambiente

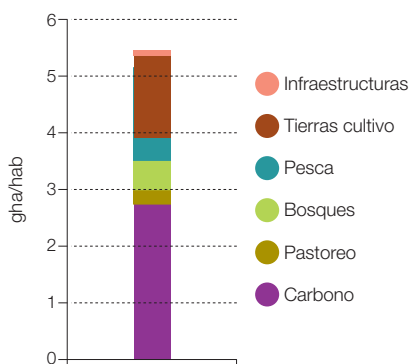
Figura 777. Estructura del uso del territorio en el año 2008.



que también se pueden traducir en un requerimiento de ocupación del territorio.

Una primera cuantificación de estas externalidades la podemos encontrar en la huella ecológica (National Footprint Accounts-2010 elaborado por la Global Footprint Network) de España, en la que se expresan los principales usos e impactos de la actividad humana en términos del requerimiento de superficie de productividad media planetaria (hectáreas globales). La figura 778 recoge la estructura de la huella ecológica en España para el año 2007, que con un total de 5,42 gha/hab es un 300% de la biocapacidad promedio del planeta, por lo que podríamos concluir que en España estamos ya viviendo a un ritmo que requeriría de tres planetas Tierra en el caso de extrapolarlo a todos los habitantes del planeta: un claro indicador de insostenibilidad. En esta figura, podemos observar cómo ya en la actualidad la contribución dominante^{1.064} a la huella ecológica de España es la correspondiente al carbono, que refleja tan solo una de las externalidades^{1.065} del sistema energético, esto es, el requerimiento de reabsorción del CO₂ emitido, y que el sistema energético actual tiene prácticamente externalizada en su totalidad. Otro elemento que también podemos observar en esta figura, teniendo además en cuenta que la superficie para tierras de cultivo aparece magnificada al expresarla en términos de superficie de productividad media, por tratarse de la superficie de mayor productividad, es la descompensación entre la huella ecológica y la dedicación actual del territorio: mientras el sistema energético ocupa en la actualidad poco más de un 1% del territorio, dedicamos más del 50% a la producción de alimentos, lo cual está claramente desproporcionado en relación a la contribución de cada uno de estos servicios a la huella ecológica.

Figura 778. Huella ecológica de España en el año 2007 según el National Footprint Accounts-2010 elaborado por la Global Footprint Network, expresada en términos de hectáreas globales (hectáreas de productividad media) per cápita.



De hecho, resulta interesante comparar el porcentaje de ocupación del territorio asociado a la contribución del carbono a la huella ecológica con los otros valores de referencia que introdujimos anteriormente. La figura 779 nos muestra esta comparación, y en ella podemos apreciar que el uso del territorio requerido para internalizar nuestras emisiones de CO₂ resulta del orden del 226%, muy superior a los usos del territorio dedicados a la protección de espacios naturales, e incluso del dedicado a la producción de alimentos, y de hecho es tan elevado que no disponemos de territorio suficiente para su internalización. Es precisamente en este contexto en el que se aprecia la gran eficiencia de un sistema basado en energías renovables, que nos permite internalizar completamente los impactos del sistema energético, con un requerimiento de ocupación del territorio tremendamente inferior al correspondiente a la huella ecológica de carbono actual.

1.064 Además, debemos tener en cuenta que en términos de hectáreas de productividad promedio, la superficie dedicada a tierras de cultivo aparece muy distorsionada (incrementada), pues al tratarse de las tierras de mayor productividad, su superficie aumenta al pasar de hectáreas reales a hectáreas globales.

1.065 Otras externalidades no recogidas son, por ejemplo, las correspondientes a toda la minería de recursos fósiles y nucleares que se realiza fuera de nuestro país, así como las infraestructuras asociadas. Por tanto, adoptamos esta contribución del carbono a la huella ecológica como una cota inferior de la externalización del sistema energético en términos de superficie.

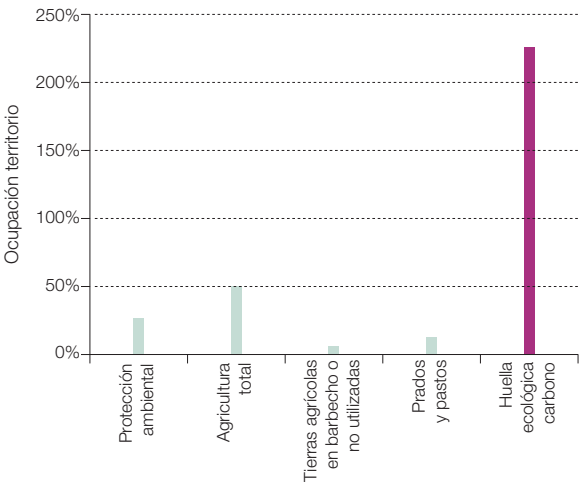
Otro factor que resulta interesante analizar en este contexto es el relativo al grado de autoabastecimiento alcanzado para la cobertura de estos servicios. La figura 780 nos muestra el autoabastecimiento energético en España^{1.066} en los años 2000 a 2009, tanto el total^{1.067} como el que podemos considerar sostenible^{1.068}, en términos relativos al consumo de energía primaria. Como podemos observar, el autoabastecimiento energético es muy bajo, y por tanto la dependencia energética muy elevada. También podemos observar en esta figura la tendencia creciente al autoabastecimiento sostenible a lo largo de los últimos años, como consecuencia directa del despegue de las energías renovables distintas de la hidroeléctrica.

En estas condiciones, parece perfectamente justificado desde el punto de vista de la sostenibilidad el aumentar la ocupación

del territorio para incrementar el autoabastecimiento energético con energías renovables, pues ello reduce la tremenda externalidad que en términos de superficie tiene el uso de combustibles fósiles para cubrir el resto de nuestra demanda de energía.

Por lo que respecta al uso del territorio empleado para configurar los sistemas de generación 100% renovables de este informe, conviene recordar que el potencial con el que contamos, y a partir del cual se han confeccionado estos mix de generación, es el potencial presentado en el informe R2050 (GP, 2005), que se evaluó a partir de un análisis SIG^{1.069} imponiendo restricciones bastante severas sobre el uso del territorio. Así, además de excluirse completamente el uso del territorio asociado a espacios con alguna figura de protección ambiental^{1.070}, tal y como puede contrastarse en el informe R2050 (GP, 2050),

Figura 779. Ocupación del territorio, en términos relativos a la superficie peninsular de los usos de protección ambiental y de producción de alimentos, comparado con la ocupación del territorio que corresponde a la contribución del carbono en la huella ecológica (situación actual).



1.066 Datos procesados a partir de la referencia (La Energía en España 2009) del Ministerio de Industria.

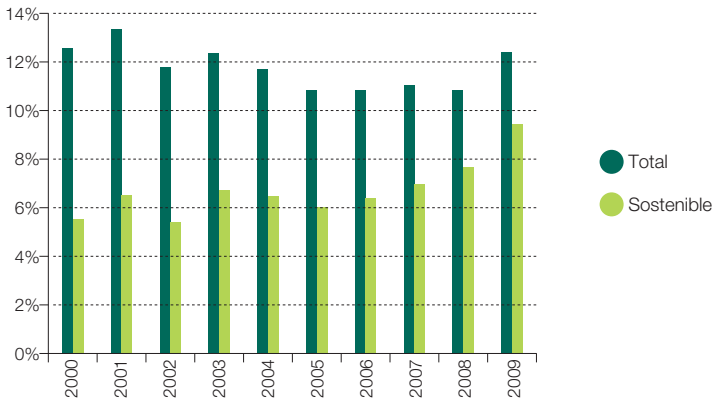
1.067 Debemos resaltar que, a diferencia del criterio del Ministerio de Industria, la generación nuclear no la hemos considerado como autoabastecimiento, puesto que tanto la materia prima (uranio), como la mayoría de etapas de procesamiento (extracción y concentración de uranio, conversión a hexafluoruro de uranio, enriquecimiento del hexafluoruro y conversión a dióxido de uranio) se llevan a cabo fuera de España, y es tan solo la última etapa, la de fabricación de los elementos combustibles, la que se lleva a cabo en España. Por tanto, desde nuestro punto de vista, el hecho de que el recurso energético venga del exterior de España, hace que la aportación nuclear no pueda considerarse como abastecimiento.

1.068 Es decir, descontando las aportaciones del carbón, petróleo y gas natural nacionales.

1.069 Sistema de Información Geográfica.

1.070 Esta exclusión constituye el 28% del territorio peninsular, y sería perfectamente posible plantear el aprovechamiento de la biomasa residual, asociada a la limpieza y conservación de parte de estos espacios, como una fuente adicional de biomasa sostenible, que además, al contribuir a evitar la proliferación de incendios forestales, redujera el efecto de escalón de desplazamiento del CO₂ de la biosfera a la fase gaseosa que nos condujo a plantear la limitación en el uso de las biomásas residuales.

Figura 780. Autoabastecimiento energético en España durante los años 2000 a 2009, en términos relativos al consumo total de energía primaria.



la gran mayoría de los espacios destinados actualmente a la producción de alimentos también fueron excluidos^{1.071} de cara a evaluar el potencial de generación, basado en energías renovables, y existen tan solo algunas pequeñas intersecciones en los terrenos de menor productividad (secanos muy áridos) en los que a lo largo de los últimos años se ha ido reduciendo la actividad agrícola. Pero es más, la cantidad del potencial de generación renovable que es preciso articular para cubrir la demanda de energía, constituye una fracción realmente pequeña del potencial disponible (figura 781), especialmente en el caso de desplegar medidas de eficiencia (contexto E3.0), en cuyo caso es del orden del 3%. En estas condiciones, si se considerara adecuado, sería perfectamente posible prescindir de cualquier intersección entre el territorio dedicado a la producción de energía y el históricamente empleado para la producción de alimentos.

Como ya hemos indicado en varias ocasiones existen muchas opciones para proporcionar una cobertura total de la demanda

con energías renovables, tanto en el contexto BAU como en el E3.0. Sin embargo, desde el punto de vista de ocupación del territorio, las implicaciones de emplear un mix tecnológico u otro tienen un efecto muy importante. En las figuras 782 a 784 recogemos los requerimientos de ocupación del territorio para la producción de electricidad, para la producción de biocombustibles e hidrógeno, y para la producción de biomasa sólida e hidrógeno. En todas estas figuras, además de los resultados para la biomasa (promedio de cultivos energéticos y CFRR), la eólica, la fotovoltaica de suelo, y la termoeléctrica, presentamos también los resultados para el mix energético empleado para complementar los requerimientos de generación eléctrica para producir hidrógeno una vez empleada toda la electricidad procedente de la regulación del sistema eléctrico. Como podemos observar, los requerimientos de ocupación del territorio asociados al uso de la biomasa procedente de cultivos energéticos y CFRR son considerablemente superiores a los de las otras alternativas.

1.071 Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que en algunos casos la producción de energía y de alimentos no resultan incompatibles, y se puede compartir un mismo territorio para ambos usos (eólica terrestre, invernaderos con chimenea solar, etc.).

Figura 781. Uso del potencial renovable disponible, en términos de potencia instalada, para la cobertura de la demanda con 100% renovables en los contextos BAU y E3.0.

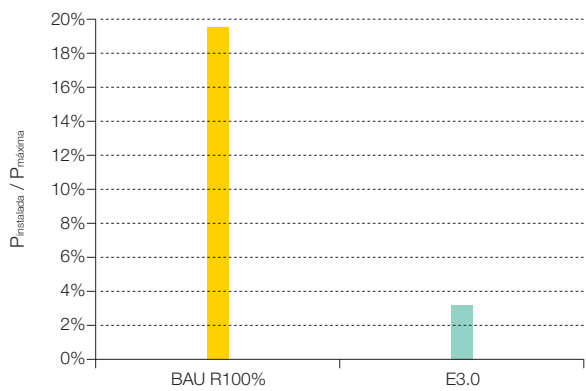
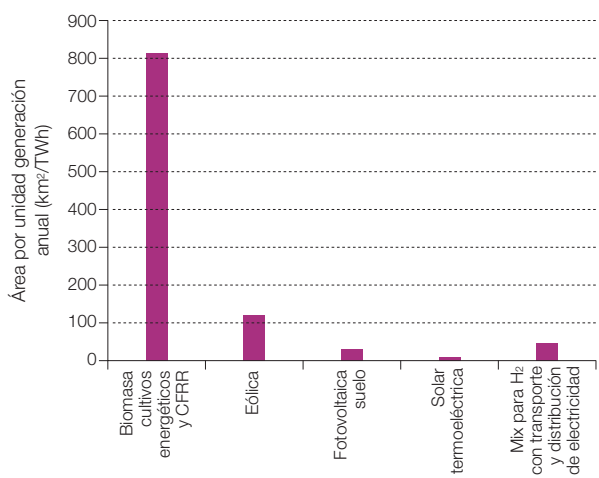


Figura 782. Comparativa del requerimiento de ocupación del territorio para la producción de electricidad.



Esto es especialmente cierto para la generación de electricidad (figura 782), lo cual, junto a la escasez del recurso biomasa es la causa de que tanto en este informe como en el informe R100% (GP, 2007), en el sistema eléctrico se haga un uso muy limitado de la biomasa, y se destine tan solo a aquellos aspectos de mayor valor añadido como es la regulación del sis-

tema, empleando la hibridación de las centrales termoelectricas como estrategia eficaz para disponer de elevada potencia de regulación con un bajo consumo de biomasa. Esta estrategia conduce a un bajo uso de la biomasa en el sistema eléctrico, y libera este recurso para poder emplearlo en la cobertura de la demanda energética en forma de combustibles.

Figura 783. Comparativa del requerimiento de ocupación del territorio para la producción de biocombustibles e hidrógeno.

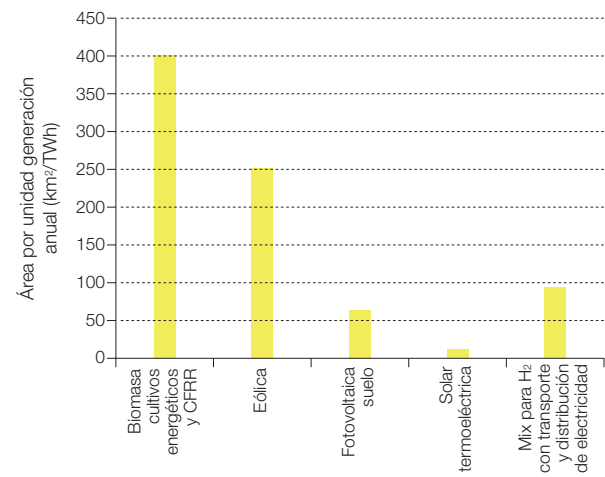
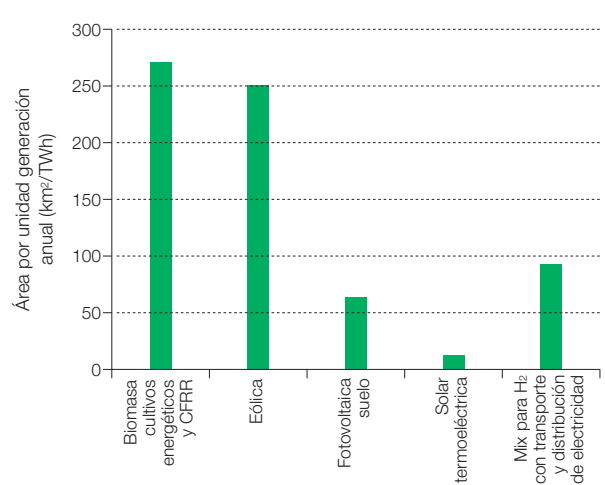


Figura 784. Comparativa del requerimiento de ocupación del territorio para la producción de biomasa sólida e hidrógeno.



Para el caso de emplear la biomasa para producir biocombustibles, la alternativa de la que disponemos es la producción de hidrógeno a partir de electricidad renovable. En este caso, tal y como nos muestra la figura 783,

la biomasa sigue siendo la opción con una mayor ocupación del territorio, aunque ya se encuentra mucho más cercano a la ocupación del territorio de la eólica terrestre^{1.072}, pero su requerimiento de ocupación del

1.072 Debemos recordar, sin embargo, que en el caso de la eólica terrestre el territorio por ella ocupado puede emplearse simultáneamente para satisfacer otros servicios (prados, agricultura, bosques, etc.).

territorio sigue siendo muy superior a la del mix empleado con el fin de complementar la producción de hidrógeno.

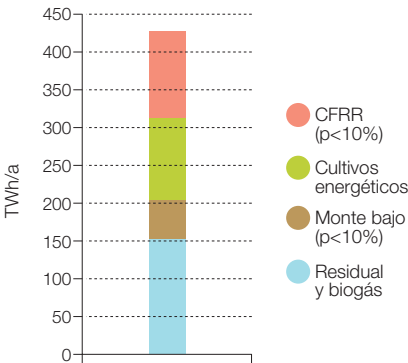
En el caso de emplear la biomasa en forma sólida, sin confeccionar otro tipo de biocombustibles a partir de la biomasa primaria, la ocupación del territorio asociada al uso de la biomasa pasa a ser del orden del correspondiente a la eólica, aunque prácticamente tres veces superior al del mix empleado para complementar la producción de hidrógeno (figura 784).

Por tanto, según el balance entre el uso de biomasa e hidrógeno empleado para la cobertura de la demanda de combustibles, el efecto sobre la ocupación del territorio del sistema energético diferirá de forma importante. En este informe hemos evaluado distintos casos en cuanto al balance entre el uso de la biomasa y del hidrógeno, para proporcionar cobertura a la demanda de combustibles. Para el contexto de demanda BAU, tal y como indicamos anteriormente, el recurso de biomasa disponible es insuficiente para proporcionar la cobertura de la demanda de combustibles, por lo que en el caso de la cobertura de la demanda BAU con 100% renovables, se debe recurrir extensamente a la producción de hidrógeno. Sin embargo, para el contexto de demanda E3.0, la participación de la biomasa y el hidrógeno en la cobertura de la demanda de combustibles puede ser mucho más equilibrada, aunque evidentemente también existe la opción de prescindir totalmente del uso de la biomasa y proporcionar esta cobertura exclusivamente basada en hidrógeno.

La figura 785 recoge la estructura del potencial de biomasa obtenido en R2050 (GP, 2005). Este potencial total de biomasa, para el desarrollo de este estudio, lo hemos limitado todavía más de tal forma que en ningún mix

de generación se superara una cantidad de recurso equivalente a la suma de los potenciales de cultivos energéticos y CFRR (221 TWh/a), de tal forma que fuera posible recurrir a la biomasa sin producir escalón alguno en la concentración de CO₂. El hecho de que se haya limitado la cantidad de biomasa a estos valores, hace que prácticamente el total de la biomasa implementada en cualquiera de los mix energéticos considerados pudiera suministrarse a partir de biomasa residual, en el caso de que la ocupación del territorio constituyera un criterio de más peso que el escalón de concentración de CO₂ asociado al cambio de uso de esta biomasa residual^{1.073}. Adicionalmente es preciso recordar que en el caso de usar biomasa de origen marino^{1.074}, la ocupación del territorio correspondiente a la biomasa sería nula, por lo que en estos casos, y desde la perspectiva de la ocupación del territorio, la opción de la biomasa pasaría a ser la más adecuada.

Figura 785. Estructura del potencial de biomasa empleado como condición de contorno para la cobertura de la demanda (GP, 2005).



1.073 Por lo que respecta a las biomasa residuales, en general hemos adoptado el planteamiento de minimizar su uso para evitar el escalón en la concentración de CO₂ que llevan asociado. Existe una excepción a esta situación, que es la constituida por la biomasa residual correspondiente a las labores de limpieza y mantenimiento de las superficies, con algún grado de protección ambiental, cuya explotación permitiría aumentar la protección contra incendios de estas masas vegetales.

1.074 Por lo que respecta a la biomasa de origen marino, su potencial no se encuentra incluido en el evaluado en R2050 (GP, 2005).

Finalmente resulta conveniente hacer una mención explícita del tratamiento correspondiente

al requerimiento de combustibles para el subsector de usos no energéticos^{1.075}. La figura 786 reproduce la estructura sectorial de la demanda de energía final para los contextos BAU y E3.0 en el año 2050. Como podemos observar, con el fin de proporcionar un balance completo de los requerimientos de energía final en términos comparables a los balances actuales del sistema energético y a otros escenarios, hemos incluido el subsector “usos no energéticos” dentro de la evaluación de la demanda. Para el contexto BAU, este subsector representa una contribución relativamente pequeña (3,5%), pero para el caso del contexto E3.0, con un mayor despliegue de eficiencia en los otros subsectores, el peso relativo del subsector “usos no energéticos” asciende hasta el orden del 10%, lo cual hace que en el caso de cubrir dicha demanda con biocombustibles, su peso relativo en el consumo total de biomasa, y por tanto en la ocupación del territorio, pase a ser muy importante.

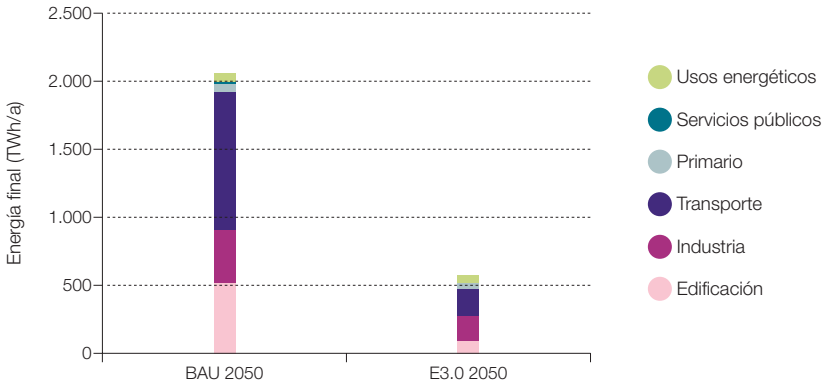
La cobertura de la demanda del subsector “usos no energéticos” cae en principio fuera de las fronteras del sistema energético en el

cual hemos centrado este estudio, sin embargo, para la mayoría de los resultados presentados, hemos incluido su efecto, al igual que haremos para el caso de las repercusiones en la ocupación del territorio.

Sin embargo, existen distintas opciones para proporcionar la cobertura de la demanda del subsector “usos no energéticos”:

- Seguir empleando combustibles fósiles para cubrir esta demanda. Si bien este planteamiento no puede considerarse estrictamente sostenible por conducir al eventual agotamiento de los recursos fósiles, pero en el caso de que se elimine el uso de estos recursos con fines energéticos^{1.076}, y desarrollando los procesos de reciclado adecuados, el consumo sería tan bajo que resultaría comparable al consumo de otras materias primas no fósiles en otros procesos productivos.
- Emplear combustibles sintetizados a partir de hidrógeno generado con electricidad renovable y carbono procedente, por ejemplo, de la fijación de CO₂ atmosférico.

Figura 786. Estructura sectorial de la demanda de energía final para el año 2050.



1.075 Los usos no energéticos de los combustibles fósiles son todos aquellos usos en que estos productos se emplean como materia prima para fabricar otros productos.
1.076 Que es dónde se encuentra actualmente su mayor consumo.

- Emplear biocombustibles elaborados con biomasa para sustituir a los combustibles fósiles actualmente empleados como materias primas en estos procesos productivos.

La opción que hemos elegido en este estudio para ilustrar el efecto de eliminar los combustibles fósiles del subsector de “usos no energéticos” ha sido la de los biocombustibles, que es la que conduce a un mayor requerimiento de ocupación del territorio. Pero dado que existen otras opciones, y que este subsector realmente queda fuera de la “responsabilidad” del sector energético, estos requerimientos adicionales de biomasa (y ocupación del espacio) deben entenderse tan solo como una cuantificación del efecto de sustituir los combustibles fósiles por biocombustibles en este subsector, pero no como un requerimiento asociado al sector energético, ni como una penalización inamovible en términos de ocupación del territorio.

5.8.2 Resultados de ocupación del territorio del sistema energético

Pasamos en este punto a reproducir los resultados de ocupación del territorio de los distintos casos de cobertura de la demanda analizados para los contextos BAU y E3.0.

Los casos del análisis de la cobertura de la demanda con 100% renovables que hemos analizado con más detalle, corresponden a dos casos particulares del balance entre el uso de la biomasa y el hidrógeno, para proporcionar la cobertura del requerimiento de combustibles:

- Para el contexto BAU hemos considerado un caso en el que se mantiene un desarrollo continuo del uso de la biomasa en relación a la situación actual, que cubre el grueso de la demanda de combustibles

mediante la generación de hidrógeno con electricidad renovable.

- Para el contexto E3.0 hemos planteado un caso con un equilibrio entre el uso de biomasa y de hidrógeno para proporcionar la cobertura a la demanda de combustibles.

Puesto que, tal y como hemos indicado anteriormente, el consumo de biomasa empleado en la cobertura de la demanda tiene un peso muy importante sobre la ocupación del territorio al emplear biomasa procedente de cultivos energéticos, vamos a empezar por recopilar los consumos de biomasa planteados para los distintos casos de cobertura de la demanda desarrollados en este estudio.

La figura 787 nos muestra el consumo total de biomasa para el contexto BAU 100% renovable (al inicio del desarrollo del escenario en el año 2007 y en el año 2050) y para el contexto E3.0, comparado con el consumo de biomasa durante el año 2009, y la planificación en el uso de la biomasa correspondiente al PER 2010, es decir, el desarrollo en el uso de la biomasa que se debería haber alcanzado en el año 2010 en el caso de haberse cumplido la planificación energética. Para los casos BAU y E3.0 en el año 2050, los resultados presentados en esta figura incluyen la biomasa empleada para proporcionar los biocombustibles que cubran la demanda del subsector de “usos no energéticos”. Del análisis de esta figura, aparte de la gran desviación entre el uso actual de la biomasa y la planificación establecida para el año 2010, podemos extraer varias conclusiones interesantes:

- El uso de la biomasa planteado para el contexto BAU en el año 2050 es del orden del uso actual de la biomasa, e inferior a la planificación para el año 2010. En este contexto BAU 100%R (BAU con generación

100% renovable), el grueso de la demanda de combustibles se cubre vía hidrógeno, y resulta el uso de la biomasa muy continuista en relación a la situación actual

- En el caso del contexto E3.0, a pesar de la gran reducción en la demanda total de energía asociada al despliegue de eficiencia, el planteamiento de repartir responsabilidades para la cobertura de la demanda de combustibles entre la biomasa y el hidrógeno conduce a un requerimiento de biomasa sensiblemente superior al del contexto BAU. Sin embargo, el uso de biomasa planteado para el año 2050 está muy en línea con la planificación energética que existía para el año 2010, por lo que se puede considerar como un escenario tendencial en el caso de que se proporcionaran los elementos necesarios para hacer realidad esta planificación energética.

Pero como indicábamos anteriormente, la figura anterior incluye en los requerimientos

de biomasa la producción de biocombustibles para dar cobertura total a los requerimientos del subsector “usos no energéticos” que, como su nombre indica, no es responsabilidad directa del sector energético, y para el cual, tal y como mostrábamos anteriormente, existen otras alternativas distintas a la biomasa. Por tanto, resulta más interesante realizar la comparativa de los recursos de biomasa directamente asociados al sector energético, cuyo resultado aparece reflejado en la figura 788. Como podemos ver, en estas condiciones, el uso de biomasa planteado para el año 2050 en el contexto E3.0 (el de mayor uso de biomasa) es sensiblemente inferior al correspondiente a la planificación energética para el año 2010, y el uso de la biomasa en el contexto BAU 100%R para el año 2050 es incluso inferior al que ya realizábamos en el año 2009. En estas condiciones resulta evidente que el uso de la biomasa planteado para proporcionar cobertura a la demanda del

Figura 787. Comparación entre el uso de biomasa planteado en los casos de cobertura de la demanda 100% renovable para los contextos BAU y E3.0, el uso de biomasa en 2009 del sistema energético, y la planificación correspondiente al desarrollo de la biomasa energética en 2010. Resultados incluyendo el subsector de “usos no energéticos”.

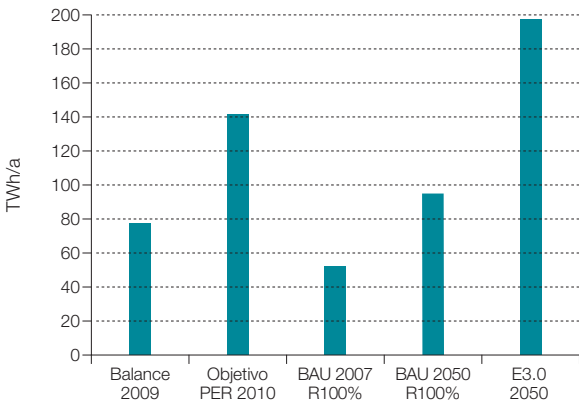


Figura 788. Comparación entre el uso de biomasa planteado en los casos de cobertura de la demanda 100% renovable para los contextos BAU y E3.0, el uso de biomasa actual del sistema energético, y la planificación actual correspondiente al desarrollo de la biomasa energética. Resultados sin incluir el subsector de “usos no energéticos”.

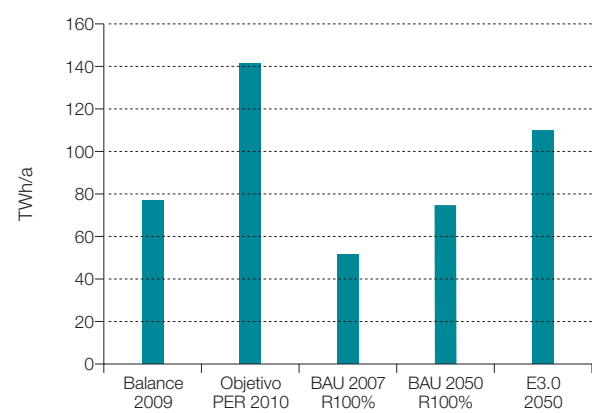
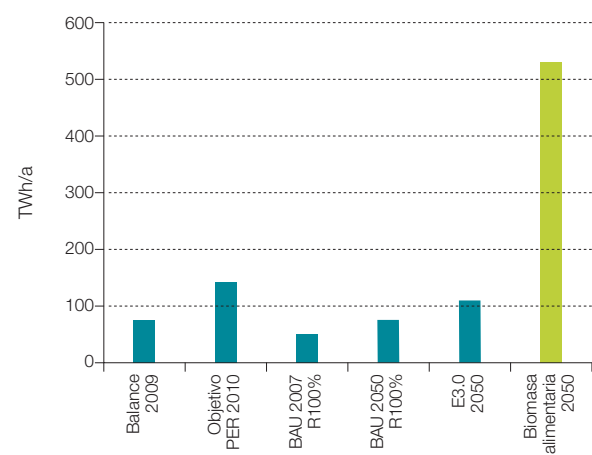


Figura 789. Comparación entre el uso de biomasa planteado en los casos de cobertura de la demanda 100% renovable para los contextos BAU y E3.0, el uso de biomasa actual del sistema energético, y la planificación actual correspondiente al desarrollo de la biomasa energética. Resultados sin incluir el subsector de “usos no energéticos”. Comparativa con los requerimientos de biomasa alimentaria para el año 2050.



sector energético en el año 2050, tanto en los contextos BAU como E3.0 no resulta en absoluto excesivo, sino más bien se podría interpretar como conservador.

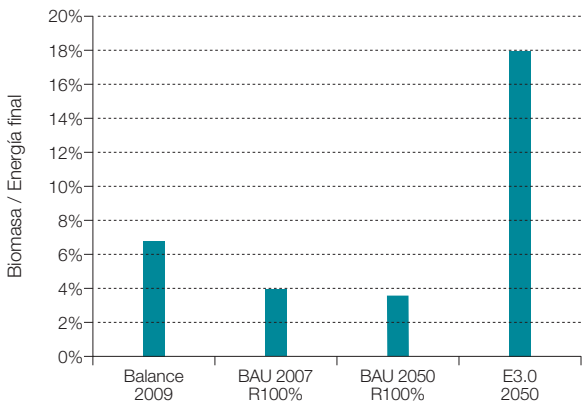
Pero es más, si comparamos estos resultados bajo la perspectiva del uso de biomasa alimenticia, la figura 789 nos muestra cómo el uso de biomasa con fines energéticos planteada para el año 2050 (tanto para el contexto BAU como para el E3.0) es muy pequeño en comparación con el uso de biomasa alimenticia que cabría esperar para el año 2050, si mantenemos una dieta promedio con una estructura parecida a la actual.

Para profundizar más en la participación de la biomasa para cubrir la demanda de energía, la figura 790 nos presenta el ratio de biomasa a energía final, mientras que la figura 791 nos reproduce el ratio de biomasa a hidrógeno empleados para proporcionar la cobertura de la demanda del sistema energético. Como podemos observar, en términos relativos a la demanda de energía final, los casos del contexto BAU suponen porcentajes inferiores al

actual, mientras que el caso del contexto E3.0 conduce a incrementar el peso de la participación de la biomasa hasta el orden del 18%, significativamente superior al actual. Por lo que respecta al ratio de biomasa a hidrógeno, en el contexto BAU es muy bajo, e indica el dominio del hidrógeno en la estructura de estos mix, mientras que en el contexto E3.0 vemos que la participación de la biomasa y del hidrógeno están muy equilibradas.

Profundizando más en la estructura de los recursos energéticos empleados para proporcionar la cobertura de la demanda en el contexto E3.0 (el de mayor uso de biomasa), la figura 792 nos muestra cómo el sistema energético total está dominado por el uso de la electricidad, con una cantidad muy importante de esta electricidad dedicada a la producción de hidrógeno, y con un equilibrio entre el uso de biomasa y de hidrógeno. El planteamiento para asignar los recursos a este caso de análisis ha sido emplear biomasa para complementar^{1.077} la cobertura de la demanda en el sector industria (mediante cogeneración y combustión directa), y para cubrir la demanda

Figura 790. Participación porcentual de la biomasa en la cobertura de la energía final. Resultados sin incluir el subsector de “usos no energéticos”.



1.077 Después de la aplicación de bombas de calor, solar térmica y electricidad directa.

del subsector “usos no energéticos”, por considerar que estas dos aplicaciones pueden ser cubiertas de forma más sencilla mediante el uso de biomasa o biocombustibles que mediante el uso de hidrógeno^{1.078}. Posteriormente, el remanente de demanda de combustibles (subsectores transporte y primario),

fue cubierto entre biomasa e hidrógeno imponiendo el criterio^{1.079} de igualdad de ocupación del territorio que, como podemos apreciar en esta figura, conduce a una contribución sensiblemente superior del hidrógeno como consecuencia de su mayor eficacia por lo que respecta a la ocupación del territorio.

Figura 791. Ratio entre la participación de la biomasa y del hidrógeno en la cobertura de la demanda. Resultados sin incluir el subsector de “usos no energéticos”.

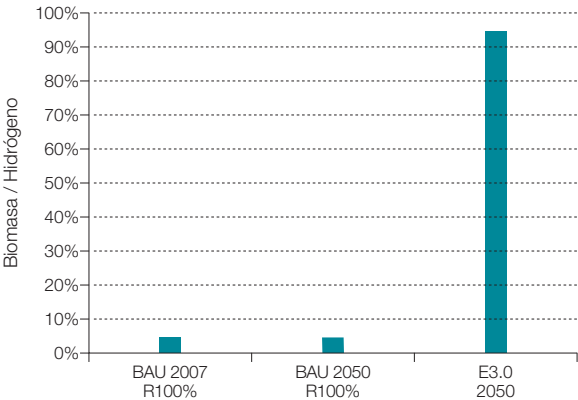
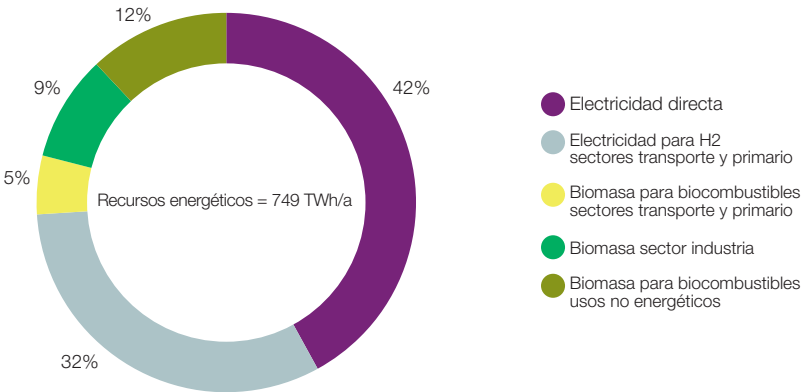


Figura 792. Recursos energéticos empleados para proporcionar la cobertura de la demanda del contexto E3.0.



1.078 Sin embargo, como comentábamos anteriormente es perfectamente posible extender el uso del hidrógeno a estas aplicaciones para reducir el uso de biomasa y con él la ocupación del territorio.

1.079 Este criterio se adoptó como un ejemplo de los posibles criterios a emplear para establecer la configuración final del mix energético a partir de las múltiples opciones disponibles.

En la figura 793 reproducimos la estructura del consumo de biomasa para el caso analizado de cobertura de la demanda en el contexto E3.0 para el año 2050, incluido el efecto de los “usos no energéticos”. Como podemos apreciar, el consumo total de biomasa se encuentra dominado por el requerimiento de

biomasa para producir los biocombustibles que cubran la demanda de materias primas en el subsector “usos no energéticos”.

Si comparamos el uso de biomasa requerido para el caso analizado en el contexto E3.0 (incluyendo el requerimiento para usos no

Figura 793. Estructura del consumo de biomasa para el caso de cobertura de la demanda analizado en el contexto E3.0.

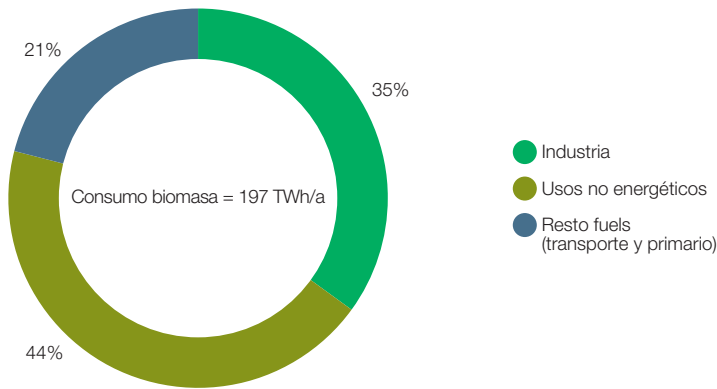
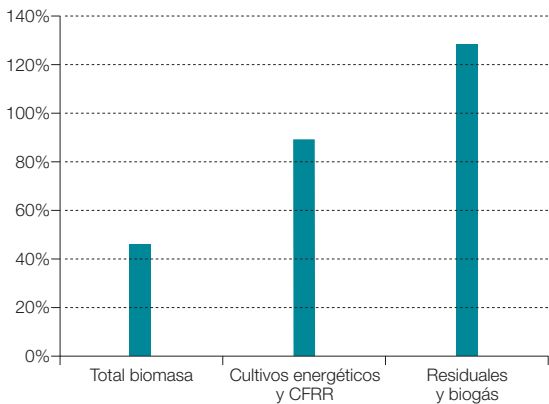


Figura 794. Valor relativo del consumo de biomasa para el caso analizado de cobertura de la demanda en el contexto E3.0. Incluyendo el consumo de biomasa para el subsector “usos no energéticos”.



energéticos) con el potencial disponible de biomasa evaluado en R2050 (GP, 2005), en la figura 794 vemos cómo el uso planteado del recurso es inferior al 50%, aunque asciende al orden del 90% del recurso de cultivos energéticos y CFRR, y es ligeramente superior al recurso de biomasa residual.

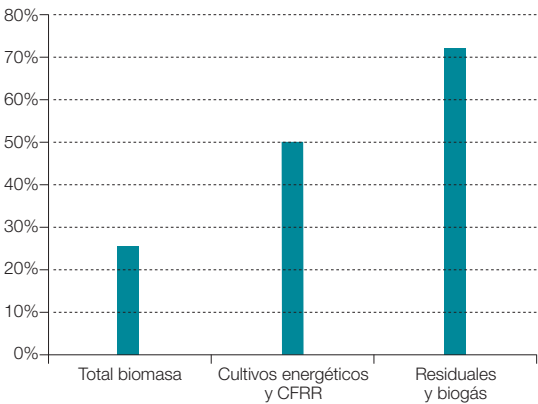
Sin embargo, si dejamos de lado el requerimiento de biomasa para el subsector “usos no energéticos”, y nos centramos en el uso de biomasa directamente imputable al sistema energético, la figura 795 nos muestra cómo el caso analizado de cobertura de la demanda en el contexto E3.0 representa un 26% del potencial total de biomasa, el 50% del potencial de cultivos energéticos y CFRR, y el 72% del potencial de biomasa residual. Es decir, en el caso de priorizar los aspectos de ocupación del territorio sobre otras consideraciones^{1.080} que pudieran favorecer a los cultivos energéticos, sería posible cubrir todo el requerimiento de biomasa para el sistema energético con biomasa residuales, es decir, sin efecto alguno sobre la ocupación del territorio.

A continuación pasamos a presentar los resultados correspondientes a la ocupación del territorio para los distintos análisis de la cobertura de la demanda realizados.

En la figura 796 presentamos la estructura de ocupación del territorio en el contexto BAU con un mix BAU. Como podemos apreciar, incluso en este contexto totalmente continuista, la ocupación del territorio asociada al sistema energético (incluido el subsector “usos no energéticos”) crecería de forma muy importante desde valores del orden del 1,5% hasta situarse por encima del 10%. Este crecimiento se encontraría dominado por las contribuciones de la biomasa (sólida y para biocombustibles) y de la participación creciente de las energías renovables en el sistema eléctrico^{1.081}.

Pero este crecimiento de la ocupación del territorio para el contexto BAU con mix BAU, todavía esconde la realidad de las grandes externalidades asociadas a un sistema energético con una elevada dependencia de combustibles fósiles. En efecto, en la figura

Figura 795. Valor relativo del consumo de biomasa para el caso analizado de cobertura de la demanda en el contexto E3.0. Sin incluir el consumo de biomasa para el subsector “usos no energéticos”.



1.080 Evitar el escalón en concentración de CO₂ asociado al cambio en el uso del recurso de biomasa residual, potenciar la agroenergética como elemento para mantener la actividad tradicional en el mundo rural, etc.

1.081 El mix eléctrico para el contexto BAU con mix BAU es el que se presentó anteriormente en este informe para la evaluación de costes.

Figura 796. Estructura de ocupación del territorio para el contexto BAU con un mix BAU.

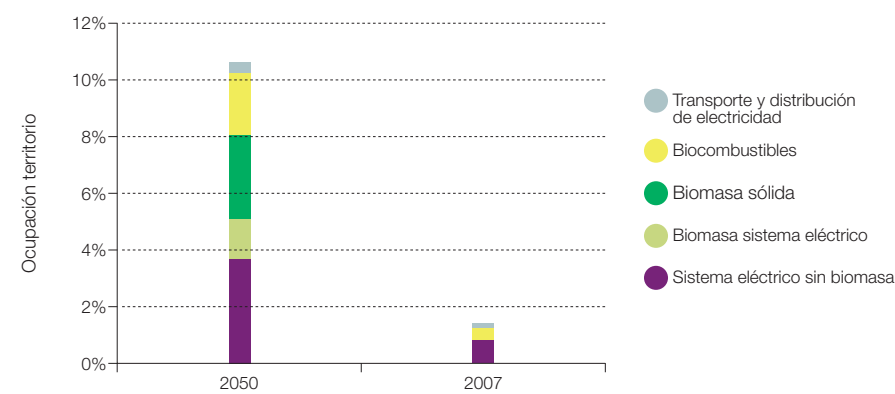
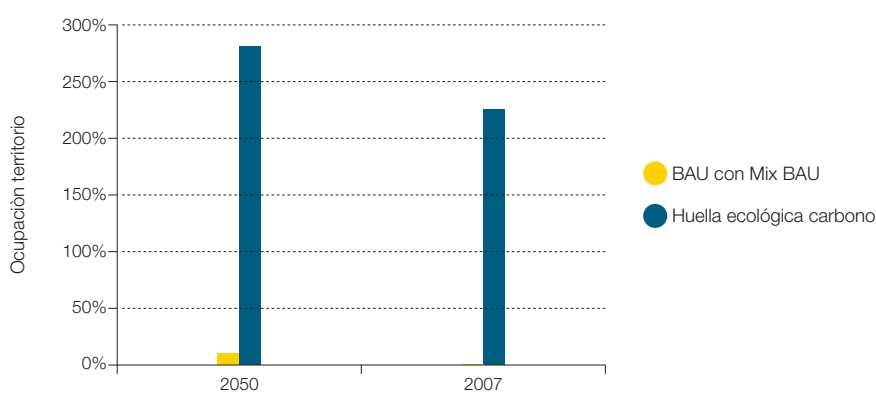


Figura 797. Comparativa entre la ocupación del territorio asociada al contexto BAU con el mix BAU, y la huella ecológica asociada al carbono.



797 recogemos la comparativa entre la ocupación del territorio asociada al sistema energético, en el contexto BAU con mix BAU y la huella ecológica de carbono^{1.082}, que como hemos comentado anteriormente estamos empleando como una primera aproximación de la huella ecológica asociada al sistema energético. Como podemos observar, el contexto BAU con mix BAU sigue externalizando la mayor parte del efecto del sistema energético sobre la ocupación del territorio.

En el caso de proceder a la cobertura total de la demanda del contexto BAU con renovables, la figura 798 nos muestra la estructura de ocupación del territorio asociada. Como podemos observar, el requerimiento de ocupación del territorio crece de forma muy significativa respecto al caso del mix BAU, y para el año 2050 pasa de requerir del orden del 10% del territorio a prácticamente llegar al 25%.

1.082 Para el año 2050, el crecimiento de la huella ecológica de carbono para el mix BAU se ve atenuado por el crecimiento en la participación de las renovables incluso en este mix BAU. Si no se produjera este crecimiento en la participación relativa de las renovables para la cobertura de la demanda, la huella ecológica de carbono en el año 2050 ascendería al 358% del territorio peninsular.

Sin embargo, aunque pueda parecer un gran incremento de ocupación del territorio, la realidad es que el territorio se emplea de forma mucho más eficiente en este caso con un mix 100% renovable que en el caso con el mix BAU, pues para el mix-100% renovable se internaliza completamente el impacto del sistema energético sobre el uso del territorio.

En efecto, la figura 799 nos muestra el ratio entre la ocupación del territorio del mix-R100% y la huella ecológica del carbono para el mix BAU, en el caso del contexto de demanda BAU. Como podemos apreciar, la ocupación del territorio al emplear el mix R100% es, en el año 2050, inferior al 9% de la huella ecológica de carbono al emplear

Figura 798. Estructura de la ocupación del territorio para el contexto BAU con mix 100% renovable.

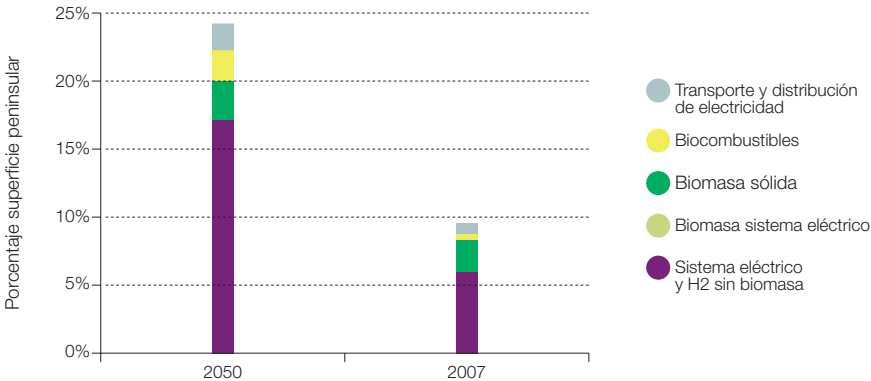
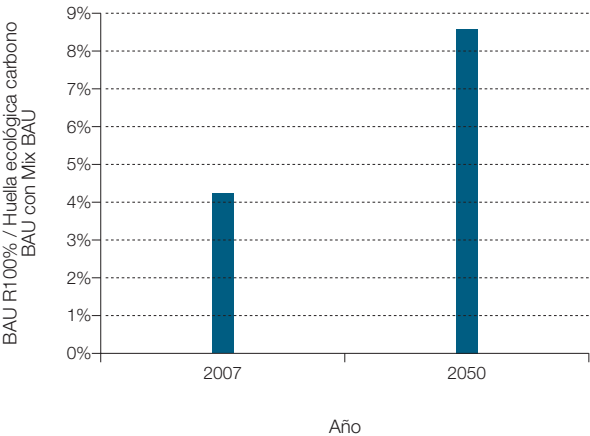


Figura 799. Relación entre la ocupación del territorio del mix R100% y la huella ecológica del carbono para el mix BAU, en el caso del contexto de demanda BAU.



el mix BAU, por lo que el proceso de inter-nalización de la huella ecológica del sistema energético al emplear el mix-R100% es muy eficiente.

Para el caso del contexto E3.0, el despliegue de eficiencia e inteligencia conduce a una gran reducción de la demanda, y en el caso de emplear un mix energético con la misma estructura (especialmente por lo que concierne al peso relativo de la biomasa), el requerimiento de ocupación del territorio se reduciría proporcionalmente. Pero tal y como hemos indicado anteriormente, el caso de cobertura de la demanda que hemos analizado para el contexto E3.0 incorpora un uso considerablemente superior de la biomasa, tanto en términos relativos como absolutos, y plantea un equilibrio entre el uso de biomasa y de hidrógeno, lo cual tiene el efecto de atenuar^{1.083} la reducción en la ocupación del territorio.

La figura 800 nos muestra la estructura de ocupación del territorio para los casos de cobertura de la demanda considerados en el contexto E3.0, sin y con participación de la gestión de la demanda. Como podemos observar, la gestión de la demanda tiene un pequeño efecto, lo que reduce ligeramente la ocupación requerida del territorio, pero en esencia, ambos casos presentan una estructura muy similar de la ocupación del territorio. Otras conclusiones que podemos extraer de esta figura son:

- El gran peso asociado a la producción de biocombustibles para cubrir la demanda del subsector “usos no energéticos”, que hace subir el requerimiento de ocupación del territorio desde valores del orden del 10% a valores del orden del 15%. Como ya hemos comentado anteriormente, este requerimiento no está directamente asociado al sistema

energético, y además existen otras opciones para su cobertura con un impacto muy inferior en términos de ocupación del territorio.

- La biomasa empleada para el sector industria (cogeneración y combustión directa) en estos mix también tiene un efecto muy importante sobre la ocupación del territorio. La priorización del uso de hidrógeno en lugar de biomasa para este sector permitiría, por tanto, reducir de forma significativa el impacto en la ocupación del territorio.
- La biomasa requerida para complementar la demanda del sector transporte tiene un impacto relativamente limitado, consecuencia directa de la gran electrificación que hemos planteado para este sector.
- El requerimiento de ocupación del territorio del sistema eléctrico y de producción de hidrógeno es del orden del 4%, a pesar de ser el que cubre la gran mayoría de la demanda de energía en el mix planteado.
- La estructura de ocupación del territorio se encuentra fuertemente dominada por la biomasa.

Pero tal y como hemos venido comentando anteriormente, los relativamente elevados requerimientos de ocupación del territorio asociados al caso analizado en el contexto E3.0 son una consecuencia directa de dos factores no estructurales: la cobertura con biomasa de la demanda del subsector “usos no energéticos”, y el elevado uso de biomasa que resulta de plantear un equilibrio entre biomasa e hidrógeno para cubrir la demanda de combustibles. Ambos elementos son perfectamente prescindibles, y corresponden tan solo a una de las múltiples opciones disponibles para la cobertura de la demanda, por lo

1.083 Aspecto que como también hemos comentado anteriormente, no es ni mucho menos estructural, y es perfectamente posible plantear casos de cobertura de la demanda con un uso muy inferior o incluso nulo de la biomasa procedente de cultivos energéticos (la de mayor impacto sobre la ocupación del territorio). El caso analizado de cobertura de la demanda, con un equilibrio entre el uso del hidrógeno y el de la biomasa, corresponde simplemente a una de las múltiples opciones disponibles.

que en el caso de priorizar el aspecto de ocupación del territorio frente a las otras consideraciones que podrían conducir al mix empleado para el análisis de la cobertura de la demanda del contexto E3.0, existe un gran potencial de reducción de la ocupación del territorio. La figura 801 nos muestra este hecho al presentar los resultados correspondientes a dos casos adicionales de cobertura de la demanda en el contexto E3.0:

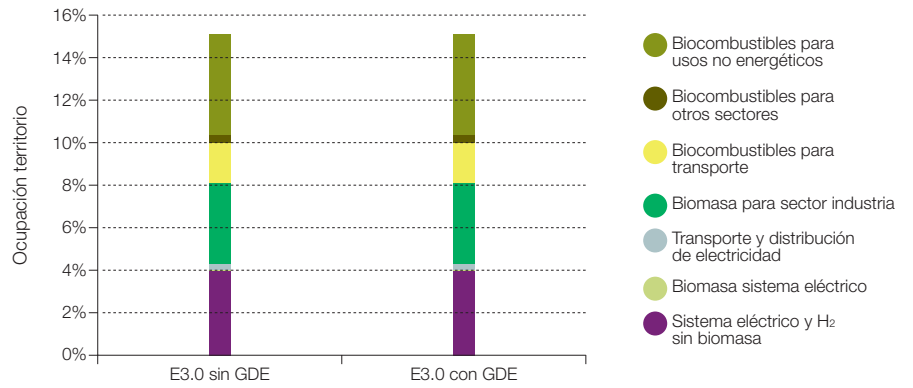
- El uso exclusivamente de hidrógeno para la cobertura de la demanda de combustibles. No considera el subsector “usos no energéticos”, y el uso de biomasa se limita a la pequeña cantidad de biomasa empleada para la regulación del sistema eléctrico^{1.084}.
- El uso de biomasa residual o marina para sustituir toda la biomasa procedente de cultivos energéticos o CFRR planteado en el caso original de cobertura de la demanda del contexto E3.0.

Como podemos observar en esta figura, de la ocupación del territorio original para dar cobertura de la demanda al contexto E3.0,

incluido el sector usos no energéticos (15,1%), puede reducirse la ocupación del territorio hasta un 6,2% en el caso de emplear exclusivamente hidrógeno^{1.085} para la cobertura de la demanda de combustibles^{1.086}, y hasta un 4,3% si sustituimos el uso planteado de biomasa procedente de cultivos energéticos y CFRR por biomasa residual y/o marina.

Pero es más, el potencial de reducción del uso del territorio para la cobertura de la demanda de energía puede ir mucho más allá de lo expuesto en el párrafo anterior, si se prioriza este aspecto sobre otras consideraciones, entre las que se encuentra el coste de generación. En efecto, el mix de generación eléctrica que hemos planteado para el análisis de la cobertura de la demanda en el contexto E3.0 partía de un planteamiento de diversidad tecnológica ponderado con los costes de generación de cada tecnología y su potencial disponible, así como para tener en cuenta la situación actual de desarrollo de las distintas tecnologías. Pero existen múltiples opciones que conducen a una menor^{1.087} ocupación del territorio si se priorizan las tecnologías de

Figura 800. Estructura de la ocupación del territorio para el contexto E3.0 en el año 2050, en los casos sin y con participación de la gestión de la demanda.



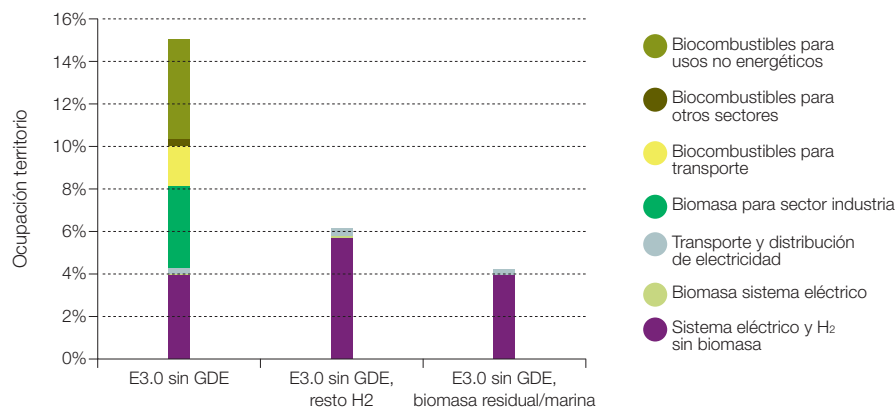
1.084 Unos 14 TWh/a, del orden del 3% del recurso disponible.

1.085 Con el mix de generación eléctrica anteriormente presentado para complementar la cobertura del requerimiento de generación de hidrógeno una vez empleada la electricidad “residual” procedente de los requerimientos de regulación del sistema eléctrico.

1.086 Es decir, sustituyendo el uso planteado de la biomasa de cultivos energéticos y CFRR por hidrógeno.

1.087 De todas formas, es preciso tener en cuenta que la ocupación del territorio del mix de generación eléctrica empleado para el análisis de la cobertura de la demanda del contexto E3.0, se encuentra fuertemente dominada por la eólica terrestre, y para esta tecnología la ocupación del territorio es muy relativa, pues puede compartir el territorio con otros usos, como la producción de alimentos.

Figura 801. Efecto sobre la ocupación del territorio de plantear la cobertura total de la demanda de combustibles con hidrógeno, o de emplear biomazas residuales o marinas para este fin. Contexto E3.0 en año 2050.



generación con menor ocupación del territorio (como la termoeléctrica), o incluso las de ocupación nula del territorio (como la fotovoltaica integrada, la eólica marina o las olas), a lo que hay que añadir la biomasa sin efectos en ocupación del territorio (biomasa residual y biomasa marina). Por tanto, en el extremo de priorizar el aspecto de ocupación del territorio por encima de los otros criterios asociados al desarrollo de un mix de generación 100% renovable para el contexto E3.0, existe potencial de generación más que suficiente^{1.088} para cubrir la demanda con una ocupación nula del territorio para la generación, y por tanto limitar la ocupación del territorio a los aspectos asociados a T&D de la electricidad, es decir, en el orden del 0,2%-0,3% según el uso que se haga de la biomasa residual y marina para proporcionar cobertura a la demanda de combustibles (sustituyendo al hidrógeno).

Por lo que respecta a la comparativa con los casos correspondientes al contexto BAU, la figura 802 nos muestra cómo el mix originalmente planteado (que incluye la cobertura con

biomasa del subsector de usos no energéticos) conduce a una ocupación del territorio que se encuentra entre las del contexto BAU para mix BAU y mix-100%R. Pero si dejamos de lado el sector de usos no energéticos, y sustituimos el uso de biomasa procedente de cultivos energéticos o CFRR por el hidrógeno o la biomasa residual/marina, el uso del territorio correspondiente a la cobertura de la demanda del contexto E3.0 es del orden de la mitad del requerido para cubrir la demanda del contexto BAU con un mix BAU, y del orden de una quinta parte del requerido para la cobertura de la demanda del contexto BAU con un mix-100%R.

Pero no conviene olvidar el hecho de que tanto en el contexto E3.0 como en el BAU con mix-100%R, se lleva a cabo una internalización completa del impacto del sistema energético sobre la ocupación del territorio, mientras que en el caso del contexto BAU con mix BAU existe una gran externalización de este efecto. La figura 803 nos presenta los requerimientos de ocupación del territorio de cada uno de los casos analizados junto a la

1.088 En efecto, considerando la demanda de electricidad directa y para producción de hidrógeno para el caso analizado en el contexto E3.0, tanto la fotovoltaica integrada como la suma de la eólica marina y las olas, podrían cada una de ellas cubrir el total de la demanda de electricidad de acuerdo con el potencial disponible.

Figura 802. Comparativa de los requerimientos de ocupación del territorio y su estructura para el año 2050 en los contextos BAU y E3.0 y con distintos mix para la cobertura de la demanda. Año 2050.

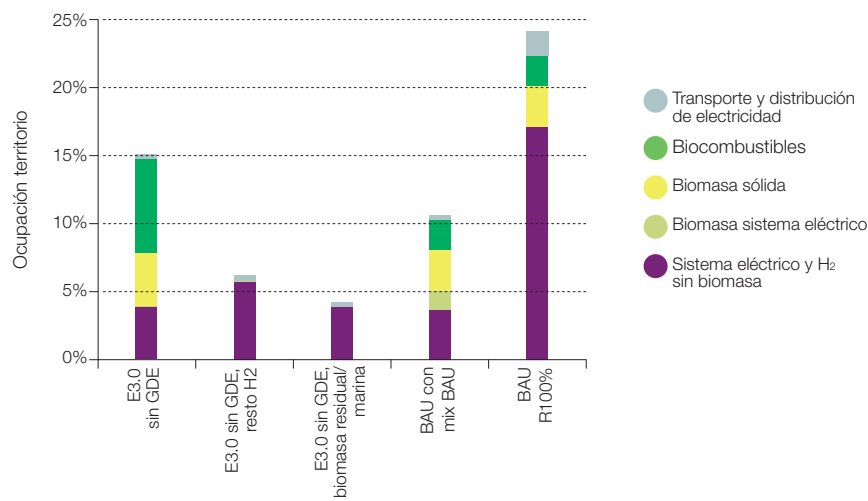
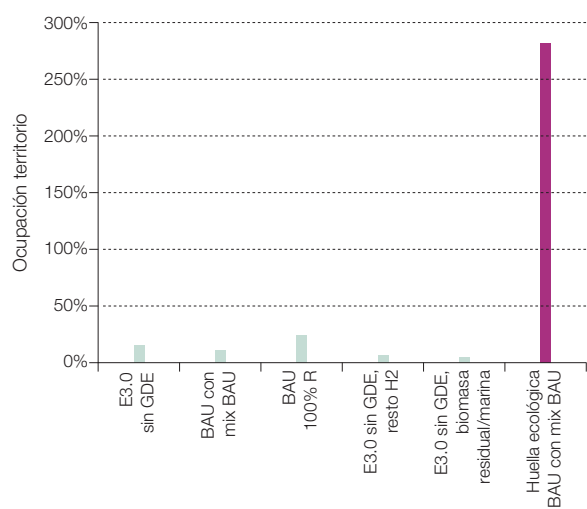


Figura 803. Comparativa de la ocupación del territorio para los contextos BAU y E3.0, con distintos mix para la cobertura de la demanda, y la huella ecológica de carbono para el contexto BAU con mix BAU.



huella ecológica de carbono del caso del contexto BAU con mix BAU para ganar esta perspectiva.

Por lo que respecta al sistema eléctrico y de producción de hidrógeno, tal y como nos muestra la figura 804, el contexto E3.0 también proporciona una gran reducción de la

ocupación del territorio, incluso en el caso de cobertura de la demanda analizado, por lo que puede alcanzar en el contexto E3.0 una ocupación prácticamente^{1.089} nula del territorio si se prioriza el uso de tecnologías sin efecto alguno en la ocupación del territorio (fotovoltaica integrada, eólica marina, olas).

Figura 804. Comparativa de la ocupación del territorio asociada al sistema eléctrico y de producción de hidrógeno para los contextos BAU y E3.0 con cobertura 100% renovable en el año 2050.

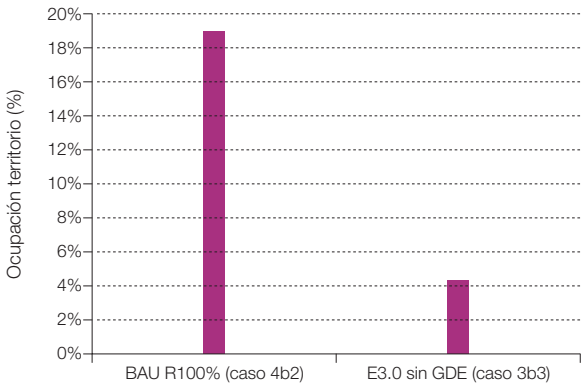
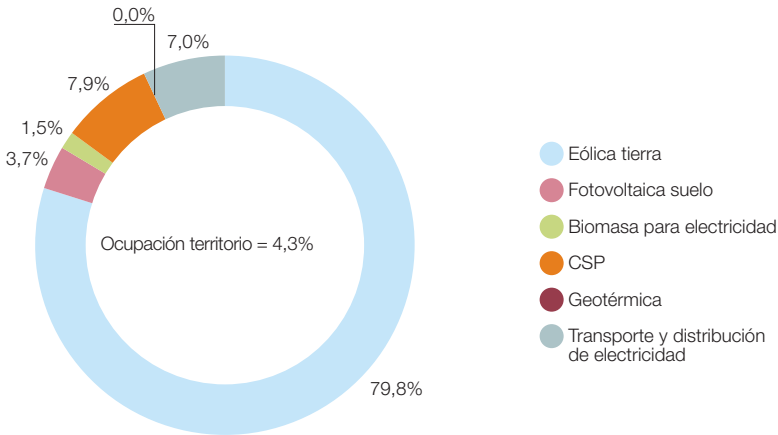
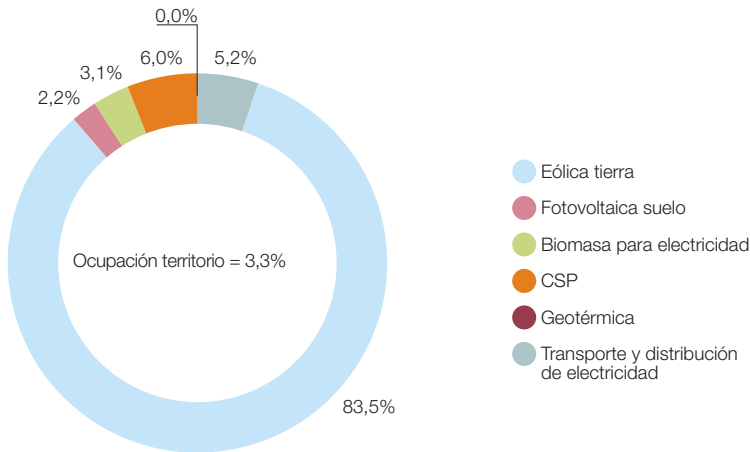


Figura 805. Estructura de ocupación del territorio del sistema eléctrico y de producción de hidrógeno para el caso E3.0 sin GDE (caso-3b3).



1.089 Tan solo quedaría el requerimiento para T&D de la electricidad, que oscila entre el 0,2% y el 0,3% dependiendo del uso que se haga de la biomasa para la cobertura de la demanda de combustibles.

Figura 806. Estructura de ocupación del territorio del sistema eléctrico (excluida la producción de hidrógeno) para el caso E3.0 sin GDE (caso-3b2).



Por último, si analizamos la estructura de la ocupación del territorio asociada a las tecnologías de generación eléctrica empleadas en el mix considerado para el análisis de la cobertura de la demanda en el contexto E3.0, en la figura 805 podemos observar cómo se encuentra fuertemente dominado por la eólica terrestre. Si tenemos en cuenta que para esta tecnología, como para el T&D de electricidad, el uso del terreno no es exclusivo de la función energética, es decir, que el sistema energético puede compartir el territorio con otros usos del terreno (como la producción de alimentos), la ocupación del territorio exclusiva para el sistema energético se reduce a un 0,6%.

Pero es más, en el caso anterior las tecnologías de generación eléctrica se emplean tanto para dar cobertura a la demanda de electricidad directa como para generar hidrógeno destinado a la cobertura parcial de la demanda de combustibles. Si nos centramos tan solo en la parte del sistema eléctrico destinada a la cobertura de la electricidad directa, a fin de poder realizar una comparativa

más equitativa^{1.090} con el sistema eléctrico actual, la estructura resultante en la ocupación del territorio es la que aparece reproducida en la figura 806. Como podemos observar, la ocupación se reduce a un 3,3%, y si le descontamos la ocupación correspondiente a la eólica terrestre y al T&D de electricidad (que pueden compartir el territorio con otros usos como la producción de alimento), la ocupación del territorio se reduce a un 0,4%, del orden de una tercera parte de la del sistema eléctrico actual (a pesar de la mayor electrificación planteada en el contexto E3.0).

1.090 De hecho sigue sin ser totalmente equitativa, pues en el contexto E3.0 se plantea una electrificación de la demanda muy superior a la del sistema energético actual, por lo que la comparativa todavía no hace suficiente justicia a los méritos del contexto E3.0.

Detalle de aerogeneradores
pertenecientes al parque
eólico Cogollos II, situado
en Cogollos (Burgos).

© PEDRO ARMESTRE





imagen

Central termosolar de torre central Gemasolar (Sevilla), propiedad de Torresol Energy, con una potencia de 15 MW. Su sistema de almacenamiento de 16 horas en sales fundidas permite suministrar energía durante las 24 horas del día.

© MARKEL REDONDO / GREENPEACE

Conclusiones

6

6.1 Conclusiones generales

En este informe se presentan los resultados de un estudio destinado a analizar las posibilidades y beneficios del despliegue de eficiencia e inteligencia por nuestro sistema energético, con el planteamiento de obtener la cobertura del total de la demanda con energías renovables.

Las fronteras del análisis realizado son:

- **Espacial:** El análisis se limita al sistema energético de la España peninsular. Este planteamiento de limitación del alcance espacial está asociado a proporcionar continuidad con estudios anteriores, y a la disponibilidad de datos para desarrollar el análisis, pero en ningún modo supone un posicionamiento estricto en relación a la conveniencia o no de explotar los intercambios energéticos con el entorno. Es decir, no se trata en absoluto de un planteamiento de autosuficiencia o soberanía energética, sino tan solo el análisis de una de las múltiples opciones disponibles para proporcionar la cobertura del total de la demanda basada en una generación 100% renovable. De hecho, la interacción sinérgica del sistema energético con su entorno^{1.091} proporciona importantes ventajas, tanto en el proceso de transición como a largo plazo, asociadas a las ventajas de la dispersión espacial de la demanda y de los recursos renovables. Sin embargo, la dimensión espacial de la España peninsular, así como la disponibilidad de recursos energéticos en la misma, hacen que el autoabastecimiento energético sea una de las opciones posibles. Sin embargo, queda fuera del alcance de este estudio el analizar el grado óptimo de autoabastecimiento energético alcanzado mediante el balance óptimo de interconexiones internacionales,

para aprovechar los efectos de dispersión espacial y acceder a mejores recursos renovables, así como al desarrollo del potencial de generación endógeno. De hecho, la evolución del entorno regulatorio, político, económico y social en España y los países de su entorno durante el periodo transitorio en el que evolucionemos desde el contexto actual (BAU) al contexto eficiente (E3.0), y en el que procedamos a desplegar un sistema de generación 100% renovable, probablemente condicionarán más el grado de autoabastecimiento energético finalmente desplegado que los objetivos asociados a un proceso de optimización de esta variable. Adicionalmente, el plantear la cobertura total de la demanda en un entorno espacialmente más limitado (alcance de la España peninsular), siempre resulta más complejo desde un punto de vista técnico que el ampliar el alcance espacial y aprovecharse del elemento de flexibilidad que proporcionan las conexiones internacionales y el acceso a la capacidad de generación renovable situada fuera de nuestro país.

- **Temporal:** El periodo temporal analizado va desde el año 2007 hasta el año 2050. La fecha inicial, año 2007, se corresponde con la de disponibilidad de la mayoría de datos empleados para desarrollar el análisis, aunque en aquellas situaciones en las que se disponía de información de años más recientes, se ha realizado lo posible para incorporarla en el análisis. La fecha final, año 2050, se corresponde con la empleada en otros estudios relacionados, y se encuentra suficientemente lejana como para plantearse el desarrollo del proceso de transición desde un contexto BAU a uno E3.0, y suficientemente cercana para que esta transición todavía^{1.092} tenga capacidad para cumplir con las limitaciones que impone nuestro sistema climático.

1.091 Especialmente con el resto de Europa y el norte de África.

1.092 Evidentemente estamos hablando de completar el proceso de transición, y es imprescindible que su inicio se produzca ya mismo. Como ilustraremos a lo largo de este informe, los retrasos en el proceso de transición tendrán importantes consecuencias directas tanto en las posibilidades de ajustarnos a los requerimientos del sistema climático, como en los costes asociados al proceso. La consigna principal, tanto desde las perspectivas medioambiental, económica y social, sería el acelerar tanto como fuera posible este proceso de transición.

- Sectorial: El estudio considera la totalidad del sistema energético, es decir, subsectores edificación, transporte, industria, primario, servicios diversos, y el subsector de usos no energéticos habitualmente contemplados en los balances energéticos.
- Contextual: Se analizan dos contextos principales, el contexto E3.0 en el que se procede al despliegue de eficiencia e inteligencia por el sistema energético (que asume el correspondiente despliegue de inteligencia por el resto de sistemas: político, social, económico, administrativo, etc.), y un contexto BAU empleado como referencia para cuantificar las implicaciones de proceder a la transición hacia el contexto E3.0.
- Ahora constituyen escenarios del sistema energético total, y se han desarrollado dos escenarios independientes, uno para el contexto BAU y otro para el contexto E3.0.
- Los escenarios de demanda desarrollados en este estudio son de un carácter mucho más detallado que los de los estudios anteriores: mientras antes se trataba de escenarios tendenciales macro, ahora se trata de escenarios desarrollados de abajo arriba, que parten del análisis detallado de la estructura de la demanda en cada uno de los subsectores y del potencial de despliegue de eficiencia en la misma, para posteriormente agregar la demanda total a nivel peninsular y multisectorial.

El estudio desarrollado tiene una relación directa con los estudios R2050 (GP, 2005) y R100% (GP, 2006), en el sentido de que el potencial de generación de las distintas tecnologías renovables, así como la estructura y escenarios de coste asociados, se toman de esos dos estudios. Asimismo, amplía el alcance del segundo estudio para pasar de considerar la cobertura de la demanda de un sector eléctrico BAU a la totalidad del sistema energético. Por otro lado, el estudio R100% (GP, 2007) se centraba en analizar la capacidad de cobertura de una demanda BAU con energías renovables, así como los costes asociados, mientras que este estudio explora el potencial de despliegue de la eficiencia e inteligencia, analizando la capacidad de la demanda para participar de forma activa en el sistema energético.

Los escenarios de evolución de la demanda desarrollados en este estudio también tienen un carácter muy distinto a los empleados en los estudios R2050 (GP, 2005) y R100% (GP, 2006) en dos aspectos:

En este punto recogemos las conclusiones principales de este estudio, mientras que en los puntos siguientes presentamos conclusiones específicas de los distintos capítulos.

Las principales conclusiones que se desprenden de este estudio son:

- El despliegue de eficiencia e inteligencia por el sistema energético, y la cobertura del 100% de la demanda de energía con energías renovables, más allá de resultar técnicamente viables, constituyen opciones tremendamente favorables en comparación a una alternativa BAU desde todos los puntos de vista: técnico, económico, ambiental y de ocupación del territorio. Es más, la transición desde el contexto BAU al E3.0 debería producirse tan rápidamente como seamos capaces, pues cualquier retraso en el proceso de transición conlleva importantes penalizaciones ambientales y económicas.
- Si bien existen recursos renovables suficientes para cubrir la demanda BAU del conjunto del sistema energético en el horizonte

considerado (año 2050), el despliegue de eficiencia e inteligencia por el sistema energético resultan elementos imprescindibles para garantizar la sostenibilidad a largo plazo y para limitar los recursos (económicos y de ocupación del territorio) necesarios para proporcionar la cobertura de la demanda.

- La integración y electrificación del sistema energético constituyen elementos fundamentales del despliegue de eficiencia e inteligencia, y permiten reducir de forma muy importante la demanda de energía final y optimizar el aprovechamiento de la generación basada en energías renovables.
- El despliegue de inteligencia por el sistema energético es condición necesaria pero no suficiente para alcanzar el potencial del contexto E3.0. Adicionalmente es menester que le acompañe el despliegue de inteligencia por los sistemas político, económico, social y administrativo. En concreto, un elemento fundamental es la articulación de los mecanismos económicos, políticos, administrativos y sociales que nos permitan evolucionar de un metabolismo social completamente dependiente de la venta de productos, a otro completamente apoyado en la prestación de servicios.
- A pesar de la gran electrificación planteada en el contexto E3.0, especialmente en los sectores edificación y transporte, gracias al despliegue de eficiencia e inteligencia por el sistema energético, la demanda de electricidad total no experimenta un crecimiento importante, y se mantiene en el orden de magnitud de la demanda actual. Por tanto, no es preciso considerar el requerimiento de un gran incremento en el despliegue de infraestructura del sistema eléctrico, especialmente por lo que se refiere a las redes de transporte y distribución, que si bien deberán adaptarse

a los requerimientos de un sistema de generación basado en renovables, no deberán acomodar un gran incremento de la electricidad demandada. En efecto, el ratio de la demanda de electricidad directa en el contexto E3.0 para el año 2050 es tan solo el 114% de la demanda de electricidad en el año 2007. Es más, la demanda de electricidad en el año 2050 para el contexto E3.0 es tan solo el 57% de la demanda de electricidad que correspondería al contexto BAU para el año 2050, a pesar de la menor electrificación del contexto BAU, por lo que la transición al contexto E3.0 permite acotar de forma muy significativa los requerimientos de ampliación de la infraestructura del sistema eléctrico.

- Para una parte de la demanda del sistema energético actualmente cubierta con combustibles fósiles, la electrificación no resulta viable o no constituye la alternativa más apropiada. Para proporcionar la cobertura de esta parte de la demanda existen dos opciones disponibles, así como cualquier combinación entre ellas: biomasa e hidrógeno. La elección entre los pesos relativos de biomasa e hidrógeno a emplear para proporcionar cobertura a esta parte de la demanda, tiene implicaciones importantes en la configuración del sistema energético y en ocupación del territorio asociada al mismo, además de estar sujeta a la disponibilidad de recursos renovables (mucho más limitada para la biomasa que para el hidrógeno procedente de electricidad renovable). En este estudio nos hemos centrado en desarrollar con más detalle dos casos de cobertura de la demanda con 100% renovables: un mix dominado por el hidrógeno para el contexto BAU, en el que la gran demanda de combustibles no permitiría planear su cobertura únicamente con biomasa, y un mix para el contexto E3.0 que plantea

un equilibrio entre el uso de la biomasa y del hidrógeno, que apuesta por la diversidad del sistema energético, a pesar de que en este caso sí que sería posible cubrir la totalidad de la demanda de combustibles con el recurso disponible de biomasa. Adicionalmente, y especialmente de cara al análisis de los efectos sobre el requerimiento de cobertura del territorio, hemos analizado también el caso de la cobertura del total de la demanda de combustibles en el contexto E3.0 con hidrógeno.

- El indicador principal empleado en este estudio para comparar los distintos casos de análisis de cobertura de la demanda desarrollados, así como para cuantificar las ventajas de desplegar eficiencia e inteligencia, y de basar la cobertura de la demanda en un sistema 100% renovable, es el coste absoluto total asociado al sistema energético. Se presentan también resultados para el coste específico por unidad de energía, pero al considerar casos con distinta demanda total del sistema energético, el indicador relevante es el coste total.
- En el estudio R100% (GP, 2006) ya mostramos que los sistemas de generación basados en energías renovables disponían de suficientes mecanismos de flexibilidad desde el lado de la oferta para permitir garantizar la cobertura de la demanda con muchas posibilidades para la configuración del mix de generación empleado. En el estudio actual, la integración del sistema energético y la disponibilidad de mecanismos de flexibilidad adicionales por el lado de la demanda, todavía facilitan más el proporcionar la cobertura de la demanda, por lo que el análisis detallado (a nivel horario) de cobertura de la demanda se ha limitado a unos pocos casos representativos para el contexto BAU y el E3.0.
- La biomasa, como ya apuntábamos en el estudio R2050 (GP, 2005) constituye un recurso relativamente escaso con muchas aplicaciones posibles, por lo que es menester proceder con precaución a su asignación para la cobertura de la demanda. Por lo que se refiere al sistema eléctrico, en este estudio hemos mantenido el planteamiento del informe R100% (GP, 2006), en el que su aplicación se limita a las condiciones de mayor valor añadido, es decir, la regulación, de tal forma que el consumo energético total se mantenga bajo al mismo tiempo que evita el requerimiento de sobredimensionado del resto del parque generador. Al igual que en los casos analizados en el informe R100% (GP, 2006), la forma más efectiva de emplear la biomasa para regulación del sistema eléctrico es mediante la hibridación de las centrales termosolares, que proporcionan acceso a una elevada potencia de regulación con una inversión adicional menor que otras opciones. Sin embargo, en los casos analizados en este estudio, debido al mayor alcance de cobertura de la demanda (sistema energético total versus sistema eléctrico BAU), el exceso de capacidad de generación asociado a los requerimientos de producción de hidrógeno proporcionan ya una gran capacidad de regulación, por lo que los requerimientos de hibridación de las centrales termosolares se ven muy reducidos, y en algunos casos quedan relegados a una función de incrementar la seguridad de suministro ante potenciales contingencias.
- En este informe hemos introducido distintos criterios para asignar la participación de la biomasa en el sistema energético. Uno de ellos, es el asociado a la producción de un escalón en la concentración de CO₂ atmosférico, al cambiar de un uso anterior de la biomasa, con mayor tiempo de retención

del carbono en forma sólida, a un uso energético con liberación inmediata del carbono a fase gaseosa. Este criterio favorece el uso de las biomásas procedentes de cultivos energéticos (no conllevan este escalón) frente a las residuales. A fin de garantizar que los mix energéticos considerados podrían cumplir con este criterio, la cantidad de biomasa a incorporar en el mix energético se ha limitado al potencial de cultivos energéticos. El otro criterio es el asociado a la ocupación del territorio, según el cual, la biomasa procedente de cultivos energéticos es la tecnología renovable menos eficiente en términos de ocupación del territorio por unidad de energía final, por lo que si el objetivo principal es acotar el uso del territorio por parte del sistema energético, el hidrógeno procedente de electricidad renovable y/o las biomásas sin repercusión en la ocupación del territorio (residuales o marinas) resultan recursos más favorables que la biomasa procedente de recursos energéticos.

- El contexto E3.0 ofrece un gran potencial de reducción de la demanda de energía final, tanto respecto al consumo de energía final actual como especialmente respecto al consumo de energía final correspondiente al escenario BAU. Para el año 2050, la demanda total de energía final en el contexto E3.0 es un 28,3% de la demanda de energía final en el contexto BAU, y un 44,5% de la demanda de energía final en el año 2007. Y este despliegue de eficiencia se consigue acomodando un escenario de crecimiento de la población y del PIB. El reparto sectorial de esta reducción de demanda de energía final, en términos del ratio del consumo final de energía en el contexto E3.0 respecto al del contexto BAU para el año 2050, es el siguiente: sector edificación 19,5%, sector industria 47,8%, sector transporte 19,7%, sector primario 68,9%, sector servicios públicos

37,7%, y sector usos no energéticos 80,0%. En términos del ratio entre el consumo de energía final en el año 2050 al consumo de energía final en el año 2007, el reparto sectorial es el siguiente: sector edificación 35,8%, sector industria 60,2%, sector transporte 34,9%, sector primario 81,2%, sector servicios públicos 34,3%, y sector usos no energéticos 62,9%.

- Como ya hemos indicado anteriormente, de cara al año 2050, y a pesar de la gran electrificación planteada en el contexto E3.0, la demanda de electricidad directa en el contexto E3.0 es tan solo el 57% de la demanda de electricidad en el contexto BAU. Sin embargo, gracias a esta gran electrificación, el mayor efecto se nota en la demanda de combustibles, que para el contexto E3.0 es tan solo el 18% de la correspondiente al contexto BAU.
- En términos de emisiones de CO₂, el contexto BAU, a pesar de reducir en un 20,8% el coeficiente de emisiones en términos de energía final entre los años 2007 y 2050 como consecuencia de las mejoras consideradas en este contexto, debido al incremento de la demanda de energía conduce a un incremento del 24,3% en las emisiones totales. En estas condiciones, el contexto E3.0 permite evitar la emisión de 493 MtCO₂/a en el año 2050.
- En este estudio, además de analizar los estados inicial y final del escenario temporal considerado, se han analizado distintas opciones asociadas al proceso de transición desde el contexto BAU al E3.0. Por lo general, se han considerado tres trayectorias tipo de transición: retardada, lineal y responsable. En los escenarios de transición retardados, se retrasa el inicio del proceso de transición, lo cual introduce requerimientos de

velocidades de transición más elevadas en los últimos años del periodo de tiempo considerado, a fin de completar la transición en el periodo de tiempo disponible. El escenario de transición lineal implementa una velocidad constante del proceso de transición a lo largo del periodo de tiempo considerado. Y el escenario de transición responsable acelera el proceso de transición en los primeros años del periodo de tiempo considerado. Las implicaciones de uno u otro proceso de transición, tanto en términos de consumo energético, como de emisiones y de costes, son muy importantes. En particular, el escenario retardado conduce a unos grandes picos del consumo de energía (133,6% del valor en el año 2007) y emisiones (124,6% del valor en el año 2007) en torno al año 2030, totalmente incompatibles con la disponibilidad de recursos energéticos y con los requerimientos de nuestro sistema climático.

- Desde el punto de vista de la compatibilidad con el sistema climático, la opción de un contexto BAU con un mix de generación BAU no es compatible. Por tanto, para el contexto BAU, además de la opción mix BAU hemos considerado la opción de mix-100%R, lo que refleja la situación en la que no despleguemos por el sistema energético el potencial de eficiencia e inteligencia, y que procedamos a cubrir con generación renovable el conjunto de la demanda. Desde un punto de vista económico, incluso si tenemos en cuenta una atenuación de la inflación incremental en el precio de los combustibles fósiles, asociada a que en la mayoría de países se proceda a la transición hacia sistemas energéticos 100% renovables, e incorpore los costes correspondientes al despliegue de infraestructura adicional para la generación y acumulación de hidrógeno, a pesar de que en el año 2007 el

coste de la energía (promedio del total del sistema energético) con el mix-100% renovable sería un 314% del correspondiente al mix BAU, en el año 2050 el coste de la energía con el mix-100%R sería un 49% del correspondiente al mix BAU, lo que proporciona un acceso a un gran potencial de ahorro y contención de precios más allá del año 2050. De hecho, incluso en el periodo 2007-2050, el BAU con mix-100%R tendría un coste inferior (el 88%) al BAU con mix BAU.

- La transición al contexto E3.0 proporciona un gran potencial de reducción de costes del sistema energético. En efecto, para el año 2050, el coste específico de la energía (promedio de todo el sistema energético) para el contexto E3.0 es un 30% del correspondiente al contexto BAU con mix BAU (y un 74% del correspondiente al contexto BAU con mix-100%R). En términos del coste absoluto del sistema energético, estas diferencias se incrementan como consecuencia del gran ahorro de energía asociado al contexto E3.0, de tal forma que el coste total del sistema energético en el año 2050 para el contexto E3.0 es tan solo de un 9% del coste correspondiente al contexto BAU con mix BAU (y un 22% del correspondiente al contexto BAU con mix-100%R). Por tanto, basándonos en los costes del sistema energético para el año 2050, los recursos económicos liberados para el despliegue de las medidas de eficiencia e inteligencia serían del 29 c€/2007/kWh-ahorro, muy superior al coste promedio de las medidas de eficiencia que se requiere desplegar para materializar el contexto E3.0.
- Si bien la comparativa a nivel de costes en el año 2050 es representativa de la ventaja que permanece en el tiempo más allá del periodo de análisis, los costes promedios en

el periodo hasta el año 2050 resulta representativo de los costes y potencial de ahorro asociados al periodo de transición desde el contexto BAU al E3.0. El valor promedio del coste absoluto del sistema energético en el periodo 2007-2050 para el contexto E3.0 es del orden del 30% del coste correspondiente al contexto BAU con mix BAU. Para contextualizar el peso de este nivel de ahorro asociado a la transición al contexto E3.0, resulta conveniente indicar que el coste de las primas concedidas para las energías renovables en el régimen especial del sistema eléctrico en el año 2009 constituyen un 1,2% del ahorro anual promedio que nos proporciona la transición desde el contexto BAU con mix BAU al contexto E3.0. En términos de la disponibilidad de recursos económicos liberados durante el periodo de transición para el despliegue de las medidas de eficiencia asociadas al contexto E3.0, ascienden a 18 c€/2007/kWh-ahorro, que como comentábamos anteriormente, pueden incrementarse de forma significativa si se tiene en consideración los ahorros económicos más allá del año 2050, y que de cualquier forma son muy superiores al coste promedio de las medidas de eficiencia requeridas para materializar el contexto E3.0.

- La comparativa a nivel de costes de los distintos escenarios de transición considerados (retardado, lineal y responsable), también muestra una gran penalización de retrasar el proceso de transición. Si seguimos una trayectoria de transición retardada, se experimenta un pico en el coste anual del sistema energético entorno al año 2035, con un coste anual un 235% del coste correspondiente al año 2007. Esta tendencia, fuertemente inflacionista de los costes del sistema energético, mantenida durante un periodo de tiempo tan elevado, introduce una gran presión sobre el sistema económico,

y dificulta la salida de los procesos de crisis al potenciar la aparición de nuevas crisis que comprometan el desarrollo de la transición hacia el contexto E3.0. Al seguir la trayectoria del escenario de transición lineal, el pico en el coste anual del sistema energético se produce en torno al año 2027, y se limita a un 154% del coste correspondiente al año 2007. La situación más deseable corresponde a seguir la trayectoria del escenario de transición responsable, en la que el pico se alcanzaría en torno al año 2016 con un coste de tan solo el 112% del coste correspondiente al año 2007, a partir de cuyo momento se experimentarían costes anuales del sistema energético decrecientes. En términos de costes promedios del sistema energético en el periodo 2007-2050, el escenario de transición retrasado conduciría a un coste del 211% del correspondiente a un escenario de transición responsable, mientras que un escenario de transición lineal conduciría a un coste promedio del sistema energético en este periodo del 149% del correspondiente a un escenario de transición responsable. Por tanto, podemos ver cómo el acelerar el proceso de transición, además de conducirnos a una situación compatible con la disponibilidad de recursos y con las restricciones del sistema climático, nos proporciona un gran ahorro económico, y nos sitúa en una senda de evolución de los costes del sistema energético que favorece el saneamiento del sistema económico, lo que contribuye a alejarnos de los contextos favorables a la aparición de episodios de crisis que las trayectorias de transición más retardadas no consiguen despejar completamente.

- En términos de ocupación del territorio, las implicaciones de la transición hacia el contexto E3.0 son muy variadas según el tipo de mix energético empleado, y en particular de la participación de la biomasa

procedente de cultivos energéticos en la cobertura de la demanda. Pero para cualquiera de las opciones de mix energético empleadas para cubrir la demanda del contexto E3.0 con energías renovables, la ocupación del territorio, asociada al sistema energético, resulta muy inferior a la huella ecológica del sistema energético en un contexto BAU, e incluso muy inferior a la huella ecológica actual del sistema energético. Por tanto, la transición hacia el contexto E3.0 resulta en cualquier caso tremendamente eficiente en relación a la reducción del impacto del sistema energético sobre el territorio, proporcionando además una internalización completa de la huella ecológica actual totalmente externalizada.

- Dentro del contexto BAU, la ocupación del territorio asociada al sistema energético se incrementaría de forma muy importante desde valores del orden del 1% del territorio peninsular al inicio del periodo considerado, hasta valores del orden del 10,6% en el año 2050 al emplear un mix BAU, y llegar hasta un 24,1% al emplear un mix-100%R. Sin embargo, así como el caso mix-100%R internaliza completamente la huella ecológica del sistema energético, el caso con mix BAU tiene una huella ecológica totalmente externalizada que representaba el 226% del territorio peninsular en el año 2007, y que llegaría a ser el 358% del territorio peninsular en el año 2050. Por tanto, dentro del contexto BAU, a pesar de que la ocupación del 24,1% del territorio pueda parecer muy elevada, bajo la perspectiva de la internalización de la huella ecológica del sistema energético, la transición hacia un mix-100%R resulta tremendamente eficaz en términos de ocupación del territorio.
- Para el contexto E3.0 la ocupación del territorio presenta una fuerte dependencia del

uso que se haga de la biomasa procedente de cultivos energéticos y de las tecnologías de generación renovable sin repercusiones en la ocupación del territorio (fotovoltaica integrada, eólica marina, olas, etc.). Además, es preciso tener en cuenta que tecnologías como la eólica, que domina la estructura de ocupación del territorio en los mix de generación considerados, admite simultaneidades en el uso del territorio con otras actividades, como es la producción de alimentos. Además, todos los casos considerados en el contexto E3.0 conducen a una internalización completa de la huella ecológica del sistema energético, al estar basados al 100% en generación renovable. Si dejamos de lado los posibles requerimientos de ocupación del territorio para cubrir la demanda del sector “usos no energéticos” con combustibles de origen renovable, la ocupación del territorio del sistema energético para el contexto E3.0 en el año 2050 oscila entre un 10,4% del territorio peninsular, para un mix de generación que plantee un equilibrio entre el uso de biomasa procedente de cultivos energéticos y de hidrógeno procedente de electricidad renovable y que se apoye en un mix de generación eléctrica diverso y compatible con las estructuras de costes de las distintas tecnologías, así como su estado de desarrollo actual, y un 0% para un mix de generación apoyado exclusivamente en tecnologías renovables sin repercusión sobre la ocupación del territorio como la fotovoltaica integrada, la eólica marina y las olas (de las cuales disponemos de suficiente potencial para proporcionar la cobertura completa de la demanda en un contexto E3.0), o con un apoyo de formas de biomasa sin repercusión en la ocupación del territorio (biomasas residuales, biomasas de origen marino). Entre medias nos encontramos con una infinidad de opciones posibles. Por ejemplo, la sustitución de la biomasa

procedente de cultivos energéticos por biomasa residual o de origen marino en el mix con diversidad tecnológica original, conduciría a una ocupación del territorio del 4,3%, mientras que la sustitución total de la biomasa por hidrógeno generado a partir de electricidad renovable basado en la misma estructura del mix de generación eléctrica que en el caso anterior conduciría a una ocupación del 6,2% del territorio peninsular.

6.2 Conclusiones por capítulos

En este punto procedemos a recoger algunas de las conclusiones más específicas que se desprenden de los distintos capítulos del estudio.

6.2.1 Conclusiones sobre los planteamientos conceptuales

- La contracción en el crecimiento de la demanda de energía es un elemento imprescindible para la sostenibilidad a largo plazo. Una cuantificación de este aspecto se obtiene al plantearse un sistema energético basado exclusivamente en generación renovable. Si se toma como punto de partida el potencial existente de las energías renovables en la España peninsular evaluado en el estudio R2050 (GP, 2005), una medida de la sostenibilidad del sistema energético es el mantenerse dentro de las posibilidades del potencial de generación renovable. De acuerdo con el desarrollo de escenarios macro basado en la evolución del PIB y de la intensidad energética, se concluye que de mantener un crecimiento del PIB del 3%/a, incluso con una mejora de la intensidad energética de 2%/a, en torno al año 2040, agotaríamos todo el potencial de generación renovable, y retrasar esta fecha hasta el

2618 en el caso de limitar el crecimiento económico a un 1%/a.

- Si bien nuestra inactividad por el cambio en el pasado nos ha conducido a una situación límite bastante comprometida, imposible ya de superar con una evolución tendencial de nuestros sistemas, disponemos de ases en la manga para activar procesos de cambio en escalón, que mediante la articulación de mecanismos de respuesta rápida nos permitan reconducir nuestra evolución hacia una senda compatible con las condiciones de contorno a que están sometidos nuestros sistemas. El despliegue de inteligencia, con la integración del sistema energético y la articulación de la participación de la demanda como componente principal en la operación de nuestros sistemas, constituyen elementos claves de estos cambios en escalón.

- La integración del sistema energético se apoya fuertemente en su electrificación, lo cual conduce a tener que afrontar cambios de paradigma en los conceptos relativos a los usos tradicionales de las distintas formas de energía final. El proceso ya iniciado, incluso dentro del contexto BAU, de avance de la generación renovable en el mix eléctrico (prácticamente una tercera parte de la generación eléctrica en el año 2010 ya fue de origen renovable), proporciona una rápida progresión de la descarbonización de esta forma de energía final, así como la disponibilidad de electricidad de origen renovable de muy bajo coste procedente de los requerimientos de regulación del sistema eléctrico, que obligan a replantearse los usos que hacemos actualmente de esta forma de energía para edificar el contexto E3.0. A esto hay que añadirle el potencial de eficiencia asociado a las tecnologías electrificadas para la cobertura de la demanda de

energía final, y la gran importancia de articular la participación de la demanda en la operación del sistema energético, para lo cual la electrificación proporciona también un potencial muy superior al de otras opciones. Todo ello hace que en el contexto E3.0 asistamos a una fuerte electrificación de los distintos subsectores del sector energético, especialmente notoria en el subsector transporte y en el subsector edificación, al pasar en este último por encima de otras tecnologías más favorecidas en la actualidad como distintas formas autónomas de generación renovable (solar térmica y biomasa) o la cogeneración.

- El despliegue de inteligencia por el sistema económico, que evoluciona desde una economía basada en el consumo de productos a una fundamentada en la prestación de servicios, es uno de los principales mecanismos de respuesta rápida que pueden encauzar nuestra evolución hacia la senda del contexto E3.0 en los plazos de tiempo disponibles. Para realizar este potencial, es imprescindible que el despliegue de inteligencia alcance también a los sistemas político, administrativo e incluso social. Solo en este contexto de despliegue de inteligencia por los sistemas económico, político, administrativo y social, podemos esperar que el despliegue de inteligencia por los sistemas técnicos marque una diferencia significativa en relación a la evolución tendencial, y nos conduzca en la dirección indicada por los escenarios del contexto E3.0.

6.2.2 Conclusiones sobre los escenarios

- Por lo que respecta a la consideración de neutralidad en términos de carbono que habitualmente acompaña al uso energético de

la biomasa, en este estudio se desarrolla un análisis que muestra que si no se tiene la precaución de que el uso energético de la biomasa no desplace a otro uso anterior de esta biomasa (y entre los “usos” figuran también los procesos de descomposición natural de las biomásas residuales), la aplicación energética de la biomasa afecta al ciclo del carbono en la biosfera, y genera un escalón de desplazamiento positivo en la cantidad de carbono de la biosfera que se encuentra en forma gaseosa, y contribuye, por tanto, a incrementar la concentración de gases de efecto invernadero (GEI). Por este motivo, desde el punto de vista de la estabilización del sistema climático, tan solo resulta recomendable emplear con fines energéticos biomasa que proceda de cultivos energéticos que no desplacen a ningún uso anterior de la biomasa. Esta restricción adicional refuerza la conclusión obtenida en los estudios R2050 (GP, 2005) y R100% (GP, 2006) de la imperiosa necesidad de ser muy cuidadosos con el uso que se hace de la biomasa en el sistema energético, dada la escasez relativa de su recurso y la gran cantidad de aplicaciones potenciales que tiene. Por lo que respecta a la escasez del recurso, la consideración adicional relacionada al escalón de desplazamiento de carbono a la atmósfera reduce el recurso ya de por sí escaso a un 64% del potencial evaluado en R2050 (GP, 2005). En consecuencia con estas consideraciones, en los casos analizados para la cobertura de la demanda hemos limitado el uso de la biomasa a aquellas aplicaciones de mayor valor añadido (regulación sistema eléctrico, transporte aéreo, transporte de mercancías con vehículos pesados, etc.), o a aquellas en las que a priori parece la opción tecnológica más fácilmente internalizable en el sector considerado (complemento demanda térmica industrial con cogeneración o calderas

una vez agotadas las posibilidades de la electrificación y la solar térmica). Así, por ejemplo, en el sector edificación no se realiza uso alguno de la biomasa por no cumplirse ninguna de las condiciones anteriores, y por disponer de alternativas más eficientes que se apoyan en recursos renovables mucho más abundantes.

- Otro aspecto a tener presente en relación al uso energético de la biomasa es su elevado impacto en términos de ocupación del territorio, al limitarnos a la biomasa procedente de cultivos energéticos, lo cual conduce a un criterio opuesto al anteriormente planteado, que prioriza las biomásas residuales frente a las de cultivos energéticos. La ponderación entre estos dos aspectos (efecto sobre el sistema climático y ocupación del territorio) puede conducir a distintas combinaciones del uso de los distintos recursos de biomasa. Cualquiera de los mix energéticos que hemos propuesto podrían adaptarse a uno u otro criterio, por mantener el uso de biomasa por debajo del potencial de cada uno de estos tipos de biomasa, e incluso sería posible plantearse prescindir totalmente del uso de la biomasa para la cobertura de la demanda: la gran disponibilidad y diversidad de recursos renovables permite una infinidad de combinaciones entre las distintas tecnologías para proporcionar la cobertura de la demanda. Es más, en el potencial de biomasa que estamos considerando, que procede del estudio R2050 (GP, 2005), no se incluye la aportación de biomasa de origen marino, lo cual abriría opciones adicionales a las aquí consideradas para incorporar la biomasa en la cobertura de la demanda.
- Por lo que respecta al escenario de crecimiento económico, desde el punto de vista

de la sostenibilidad es preciso plantearse a largo plazo un escenario de atenuación gradual hasta la saturación de las tasas de crecimiento. En un entorno de recursos finitos, es preciso plantearse la necesidad de eventualmente llegar a “hacerse mayores” y dejar de crecer, reconfigurando nuestro sistema económico para que esto, lejos de conllevar repercusiones negativas, aporte la estabilidad necesaria para mantener un desarrollo sostenible. En este estudio, de forma conservadora hemos planteado un escenario bastante tendencial de atenuación del crecimiento, que si bien dentro del periodo considerado (2007-2050) mantiene tasas de crecimiento económico bastante constantes, evoluciona con una atenuación gradual de las tasas de crecimiento hasta conducir a un valor asintótico del PIB entorno del año 2250.

- Por lo que se refiere al escenario poblacional, aunque existe una gran dispersión entre los escenarios existentes, para este estudio, de forma conservadora hemos adoptado el escenario de mayor población del INE, que conduce a una evolución creciente de la población peninsular a lo largo del periodo considerado (2007-2050).
- Para los dos sectores que introducen una mayor incertidumbre sobre la evolución de la demanda y sobre las posibilidades de acotar su crecimiento o invertir su tendencia al crecimiento, esto es los sectores difusos edificación y transporte, se ha procedido a desarrollar escenarios detallados “de abajo arriba” mediante modelos que permitan incorporar el efecto directo de los elementos tecnológicos con capacidad de introducir un cambio en escalón en la evolución de la demanda. Para los otros sectores se han desarrollado escenarios macro con menor grado de detalle.

- El cambio en escalón dentro del sector transporte que permite abandonar la senda actual de un consumo sectorial galopante para establecerse en el contexto E3.0, se apoya fundamentalmente en dos elementos: el despliegue de inteligencia (sistema de transporte inteligente), y la electrificación.

- En el sector transporte, la integración en el sistema energético constituye un elemento fundamental tanto para acelerar la introducción de cobertura renovable de su demanda, como para favorecer las sinergias de este sector con el conjunto del sistema energético, haciendo que pase a constituirse como elemento fundamental para articular la participación de la demanda en la operación del sistema. La electrificación constituye un componente fundamental de este proceso de integración, así como del despliegue de eficiencia en este sector. Sin embargo, a diferencia del otro sector difuso (edificación), la electrificación completa del sector transporte es más problemática, y existen ciertos modos de transporte (aéreo, marino, mercancías por carretera) en los que la electrificación directa o indirecta (vía hidrógeno procedente de generación renovable) puede resultar más dificultosa que la cobertura de esta parte de la demanda con biomasa. Con todo, conviene resaltar que estos modos menos electrificables corresponden a los modos de transporte centralizados, mientras que aquellos modos más distribuidos y en los que existe una vinculación más directa con la demanda (carretera), sí que se prestan de forma muy favorable a la electrificación completa, por lo que la articulación de la participación de la demanda en la operación del sistema energético queda también garantizada para el sector transporte.

- Los escenarios BAU de demanda específica de movilidad son escenarios tendenciales

en los que se plantea una atenuación de las tasas de crecimiento, más intensa en la movilidad de viajeros que en la de mercancías, pero que dentro del periodo considerado mantienen tasas anuales de crecimiento superiores al 0,75%/a para la movilidad de viajeros y al 1,5%/a para la movilidad de mercancías. En el contexto E3.0 se ha introducido una reducción conservadora en la demanda de movilidad, que para el año 2050 es del 12% para la movilidad específica de viajeros y del 20% para la de mercancías.

- Respecto al peso de la demanda de movilidad urbana frente a la demanda de movilidad total, se plantean escenarios tendenciales con una contribución creciente de la movilidad urbana, pero con una tendencia a la saturación hacia el final del periodo considerado.
- El escenario BAU de reparto modal de movilidad urbana de viajeros plantea una reducción gradual del peso del transporte particular por carretera a favor de los modos de transporte colectivo, pero al final del periodo considerado (año 2050) el transporte particular por carretera sigue cubriendo del orden del 65% de la demanda de movilidad urbana de viajeros.
- El elemento fundamental para acceder en el contexto E3.0 a una reducción significativamente mayor de la participación del modo particular por carretera en la cobertura de la demanda de movilidad urbana, es la articulación de un Sistema de Transporte Inteligente (STI) que introduce flexibilidad en el modo colectivo por carretera mediante el suministro de servicios de movilidad apoyados en un parque diverso de vehículos eléctricos, y en el despliegue de inteligencia. De esta forma, el cambio fundamental respecto al contexto BAU es el de propiedad del vehículo, que al pasar de ser particular a ser

colectivo y estar articulado por un STI, proporciona un salto en escalón en el nivel de eficiencia, lo que permite también una mayor migración modal a otros modos de transporte colectivo o no motorizado por la facilitación de la intermodalidad. En estas condiciones, el modo particular por carretera queda limitado en el año 2050 en torno al 25% de la cobertura de la demanda de movilidad urbana, mientras que el modo colectivo por carretera alcanza una participación modal del orden del 53%. La flexibilidad de este modo colectivo por carretera, apoyado en una infraestructura de transporte ya existente, y articulado por el despliegue de inteligencia, constituye la pieza fundamental para acceder a este potencial, al mismo tiempo que facilita el crecimiento de la participación modal del metro más allá del contexto BAU.

- Por lo que respecta a los repartos modales de la cobertura de la demanda de movilidad de viajeros no urbana, en el contexto BAU se plantean escenarios tendenciales en los que el modo aéreo va ganando peso para llegar a constituirse en el modo más importante al final del periodo considerado, al cubrir el orden del 50% de la demanda de movilidad. El modo carretera le sigue muy de cerca en importancia, y el modo ferrocarril se mantiene relegado a un papel totalmente secundario con un peso modal inferior al 5%. En el contexto E3.0, el desafío principal es reducir el peso del modo aéreo, lo cual se consigue mediante el apoyo de un modo carretera electrificado y flexible, operado por un STI, que de hecho actúa como una extensión del modo ferrocarril en origen y destino (eléctrico y con niveles de consumo específico del mismo orden), lo que permite a sí mismo potenciar de forma importante la participación de este modo. En estas condiciones, los pesos modales de los principales modos en

el contexto E3.0 para el final del periodo considerado son del orden del 58% para la carretera, del 26% para el aéreo, y del 15% para el ferrocarril.

- Por lo que se refiere al reparto modal del transporte no urbano de mercancías, en el contexto BAU se mantiene una estructura muy parecida a la actual, con un dominio absoluto del modo carretera (del orden del 78%), seguido por el modo marítimo en importancia (del orden del 18%) y el modo ferrocarril con una contribución de segundo orden (entorno al 1%). En el contexto E3.0 se plantea un escenario con un mayor retraso en la electrificación del modo carretera asociado al STI, consecuencia del requerimiento de desplegar una infraestructura de electrolíneas para camiones, por lo que la evolución modal se dirige en las primeras etapas del escenario a desplazar el modo carretera por el modo ferrocarril apoyándose en el despliegue de inteligencia. Al final del periodo considerado, el reparto modal sigue dominado por el modo carretera (pero ahora con un peso del orden del 62%), seguido por el marítimo (del orden del 18%), y el ferrocarril (del orden del 17%).
- Por lo que se refiere a los consumos específicos (por unidad de movilidad) de los distintos modos de transporte, la electrificación y la inteligencia (mediante un incremento de los factores de ocupación con que se usan los medios de transporte) proporcionan un amplio margen de mejora al pasar del contexto BAU al E3.0.
- Para los coches, a pesar de que el escenario BAU plantea una mejora significativa de su consumo específico a lo largo del periodo de tiempo considerado, la electrificación e inteligencia asociadas al contexto E3.0 permite acceder a un consumo

específico por unidad de movilidad del orden de 11 veces inferior.

- Por lo que respecta a las motos, en el contexto BAU su consumo específico por unidad de movilidad se mantiene significativamente por encima del de los coches, consecuencia tanto de la menor capacidad y tradición de trasladar eficiencia a estos vehículos, como de la mayor limitación en la mejora de su factor de ocupación. Para el caso del contexto E3.0, gracias a la electrificación y al despliegue de inteligencia, el consumo específico de las motos por unidad de movilidad es del mismo orden que el de los coches, y se convierten las motos en una extensión más del STI para proporcionar la flexibilidad que le permita adaptarse de forma eficiente a los requerimientos de movilidad de la demanda.
- Para los autocares, la electrificación y el despliegue de inteligencia en el contexto E3.0 permite acceder a un consumo específico por unidad de movilidad del orden de 11 veces inferior al del contexto BAU en final del periodo de tiempo considerado, a pesar de haber planteado para el contexto BAU una reducción significativa de su consumo específico por unidad de movilidad.
- Para los autobuses urbanos, la electrificación y el despliegue de inteligencia en el contexto E3.0 permite acceder a un consumo específico por unidad de movilidad del orden de 16 veces inferior al del contexto BAU en final del periodo de tiempo considerado, a pesar de haber planteado para el contexto BAU una reducción significativa de su consumo específico por unidad de movilidad.
- Para los trenes ya no existe el potencial de mejora asociado a la electrificación, por

considerar que es la misma en los contextos BAU y E3.0, pero el despliegue de inteligencia en el contexto E3.0 apoyado por un transporte eléctrico por carretera que actúa como extensión del ferrocarril en origen y destino, permite reducir al orden del 48% (y del orden de al 60% para el metro) el consumo específico por unidad de movilidad en el contexto E3.0 respecto al del BAU para el transporte de viajeros, y a un 58% para el transporte de mercancías.

- Para el transporte urbano de mercancías, la electrificación y el despliegue de inteligencia en el contexto E3.0 permite acceder a un consumo específico por unidad de movilidad del orden de nueve veces inferior al del contexto BAU en final del periodo de tiempo considerado.
- Para el transporte interurbano de mercancías, la electrificación parcial y el despliegue de inteligencia en el contexto E3.0 permite acceder a un consumo específico por unidad de movilidad del orden de cuatro veces inferior al del contexto BAU en final del periodo de tiempo considerado.
- Una estrategia importante del contexto E3.0 para poder facilitar la rápida evolución del sistema de transporte hacia una condición más sostenible, es un cambio de enfoque respecto a esos modos de movilidad que son dominantes y poco eficientes en la actualidad, pasando del enfoque convencional de pretender potenciar un cambio modal hacia otros modos más eficientes (cuyo despliegue en el contexto BAU se encuentra muy limitado), a reconvertir esos modos hacia la eficiencia (mecanismo de respuesta mucho más rápida y con un potencial muy superior de producir un cambio de gran magnitud), lo cual además nos facilita la transición modal actualmente perseguida

gracias al papel facilitador del despliegue de inteligencia.

- De hecho, al comparar el consumo específico de los distintos modos de transporte de viajeros en el contexto E3.0, observamos cómo hacia el final del periodo de tiempo considerado muchos modos de transporte (tren, bus, autocar, coche/moto) proporcionan consumos específicos por unidad de movilidad muy bajos (inferiores a 0,04 kWh/viajero-km), con el bus/autocar ofreciendo los menores consumos entorno a 0,010 kWh/viajero-km, el coche/moto con consumos entorno a 0,025 kWh/viajero-km, y el tren 0,036 kWh/viajero-km. La mayor rigidez del tren le convierte, una vez introducida la electrificación en los otros modos más flexibles, en el de mayor consumo específico de estos modos eficientes, lo cual proporciona perspectiva y justifica los planteamientos que conducen al contexto E3.0.
- En términos energéticos totales, la cobertura de la demanda de movilidad de viajeros en el contexto E3.0 para el año 2050 requiere el 28% del consumo total de energía final que la cobertura de esta demanda en el contexto BAU. A pesar de tener una electrificación considerablemente superior (23,6% para el contexto E3.0 frente a 5,5% para el contexto BAU, todo ello en términos de energía final), el consumo eléctrico en el año 2050 del contexto E3.0 para la cobertura de la demanda de movilidad de viajeros es del mismo orden que el del contexto BAU.
- En términos energéticos totales, la cobertura de la demanda de movilidad de mercancías en el contexto E3.0 para el año 2050 requiere el 16% del consumo total de energía final que la cobertura de esta demanda en el contexto BAU, pero con un gran incremento del consumo de electricidad para la cobertura de esta demanda de movilidad, asociado a una electrificación que pasa de ser inferior al 1% a alcanzar el 50% (en términos de energía final).
- En términos energéticos totales, la cobertura de la demanda de movilidad total (mercancías y viajeros) en el contexto E3.0 para el año 2050 requiere el 20% del consumo total de energía final que la cobertura de esta demanda en el contexto BAU, con una electrificación que se incrementa del 2% al 39% (en términos de energía final).
- Por lo que respecta a los escenarios de transición desde el contexto BAU al E3.0 para el sector transporte, la adopción de un escenario retardado conduce a un pico en el año 2028 de la demanda anual de energía final para el sector transporte del orden del 139% de la demanda en el año 2007, el escenario de transición lineal conduce a un pico del orden del 109% en el año 2019, y el escenario de transición proporciona una reducción de la demanda anual del sector transporte a lo largo de todo el periodo considerado. Por lo que respecta a la demanda de energía final acumulada en el periodo 2007-2050, el escenario de transición retardado conduce a un 187% de la demanda para el escenario de transición responsable, mientras que el escenario de transición lineal conduce a una demanda del 142% de la demanda para el escenario de transición responsable. Por tanto, podemos concluir la conveniencia de acelerar tanto como sea posible el proceso de transición hacia el contexto E3.0.
- En el sector edificación, la integración en el sistema energético constituye un elemento fundamental tanto para acelerar la introducción de cobertura renovable de su demanda, como para favorecer las sinergias

de este sector con el conjunto del sistema energético, haciendo que pase a constituirse como elemento fundamental para articular la participación de la demanda en la operación del sistema. La electrificación constituye un componente fundamental de este proceso de integración, así como del despliegue de eficiencia en este sector.

- Otro elemento a tener presente en el sector edificación es que el despliegue de eficiencia debe ir más allá de las demandas actualmente reguladas (climatización, agua caliente sanitaria, e iluminación para edificios no residenciales), para alcanzar a las demandas no reguladas (iluminación en edificios residenciales, equipamientos, cargas de proceso), que rápidamente pasarán a dominar la estructura de la demanda energética de los edificios a medida que se vayan desplegando las medidas de eficiencia sobre los componentes regulados de la demanda.
- Por otro lado, el hecho de que la mayoría de esta demanda no regulada de los edificios sea eléctrica, refuerza todavía más la conveniencia de electrificar la demanda regulada, pues dado que esta va a pasar a resultar el componente minoritario de la demanda total en un contexto eficiente, no se justifica el despliegue de infraestructura redundante para la cobertura de esta parte de la demanda cuando se puede cubrir perfectamente (y de forma eficiente) con la misma infraestructura dedicada a la cobertura de la componente dominante de la demanda.
- De hecho, para el contexto E3.0 se ha priorizado el despliegue de eficiencia (generación distribuida de megavatios) sobre la generación con renovables, lo que conduce a una situación en la que la demanda de climatización de los edificios prácticamente llega a anularse, lo cual, junto al hecho de que la demanda de iluminación también se ve muy reducida en virtud de las medidas de eficiencia introducidas, hace que la estructura de la demanda energética de los edificios se vea fuertemente dominada por la demanda de equipamientos y otras cargas de proceso.
- La caracterización actual de la estructura de la demanda de energía en el parque de edificios existentes, tanto la real como la potencial al internalizar todas las demandas de servicios, es muy deficiente, lo cual constituye un mal punto de partida para estructurar el despliegue de eficiencia en el sector, y un claro indicador del limitado despliegue de inteligencia en el mismo.
- La demanda potencial de energía del parque de edificios en España, tanto del de edificios existentes, como el de los construidos bajo el contexto regulatorio actual, es muy elevada. La extrapolación BAU de las tendencias actuales al año 2050 conducirían a un subsector edificación que dominaría la estructura de la demanda del conjunto del sector energético, al imponer solicitudes excesivas tanto a la disponibilidad de recursos como al sistema climático. Esto sin duda constituyen malas noticias, pero la parte buena es que el potencial de mejora en el sector edificación es tremendamente elevado, y que disponemos de mecanismos de respuesta rápida para desplegarlo de forma efectiva.
- En las condiciones actuales también existe una gran variación de la permisividad sobre el consumo energético de los edificios según la ubicación climática en la que se encuentran localizados. Desde el punto de vista del despliegue de eficiencia e inteligencia en el

sector edificación no parece tener sentido permitir esta gran dispersión espacial en la demanda de los edificios. En efecto, los resultados asociados al despliegue óptimo de eficiencia en los edificios en el contexto E3.0 conducen a una distribución de la demanda de energía de los edificios muy uniforme a lo largo de todo el territorio peninsular. Del mismo modo, la articulación del despliegue de inteligencia mediante la evolución de la venta de productos a la de servicios, tampoco parece compatible con la permisividad de una dispersión espacial de la demanda de los edificios tan elevada como la actual.

- Si partimos de la única información “oficial” disponible en relación a los niveles de demanda de energía permitidos en los edificios en España, esto es, la escala de calificación energética de los edificios residenciales (para los edificios no residenciales la escala de calificación es relativa, por lo que no aporta información alguna sobre los niveles de consumo permitidos), hemos elaborado una caracterización preliminar de la estructura de demanda energética potencial (internalización todas las demandas de servicios) del parque actual, y de lo que cabría esperar en un BAU a 2050. Al comparar estos niveles de demanda con los que se desprenden de la simulación del edificio de referencia residencial del DOE de EEUU (DOE Benchmark), llegamos a la conclusión de que los DOE Benchmark actuales representan correctamente lo que sería un BAU del sector edificación en España para el año 2050. A este respecto resulta interesante apuntar que los DOE Benchmarks implementan un nivel de exigencia regulatoria sobre los niveles de eficiencia del sector edificación que corresponden a la regulación en EEUU para el año 2004 (std 90,1-2004).
- El estudio presenta los resultados de un proceso de calibrado del modelo de consumo energético con los datos disponibles de consumo energético en el sector edificación. De este proceso de calibrado se extraen las siguientes conclusiones: la introducción del Código Técnico de la Edificación no representa una mejora demasiado significativa sobre el desempeño energético del parque de edificios existente; la demanda de energía del parque de edificios residenciales existentes es significativamente inferior a la que correspondería si se encontrara internalizada por completo la demanda de servicios, motivo por el que cabe esperar un incremento significativo de esta demanda; los datos oficiales de consumo energético, especialmente por lo que se refiere a los edificios residenciales, pueden contener un significativo error por defecto, infravalorando el consumo energético real de los edificios.
- En el contexto E3.0, las mejoras en eficiencia de la tecnología de iluminación artificial, la capacidad de introducir iluminación natural por otros medios distintos a las ventanas, y la introducción de inteligencia en las ventanas (tanto para control de ganancias solares como de pérdidas térmicas), hacen que las interacciones entre capacidad aislante de la envolvente y ahorro en iluminación por aportación de la iluminación natural se vean significativamente debilitadas, de tal forma que la relación de superficie acristalada en las fachadas no tenga un impacto tan grande sobre el desempeño de los edificios y que no aparezca un óptimo pronunciado de este parámetro de diseño.
- El despliegue óptimo de eficiencia, desde un punto de vista técnico-económico, en la envolvente opaca de los edificios, asociado al espesor de aislante empleado, queda correctamente representado por el punto de

inicio de la saturación de esta variable de diseño sobre la reducción de la demanda de energía.

- El nivel de eficiencia que hemos supuesto para el BAU a 2050, representa una importante mejora respecto a la regulación energética actual en España (CTE). Así, por ejemplo, por lo que respecta a los espesores de aislamiento de las paredes de los edificios, el BAU 2050 implementa espesores del orden del doble o superiores a los exigidos por la regulación actual (CTE) en la gran mayoría de los emplazamientos climáticos.
- El nivel óptimo de aislamiento de la envolvente del edificio, especialmente por lo que se refiere a los emplazamientos climáticos de mayor severidad climática, es muy superior a lo actualmente especificado por la regulación energética de edificios en España (CTE). A modo de ejemplo, y considerando un aislante de conductividad 0.04 W/mK, en Madrid el CTE exige del orden de 4 cm, el BAU 2050 implementa unos 9 cm, y el óptimo adoptado para el contexto E3.0 en un edificio residencial asciende a 24 cm (en Burgos, estos valores son respectivamente de 5 cm, 9 cm y 33 cm). Por tanto, podemos concluir que se requiere un gran incremento de exigencia en la regulación energética para conducir el sector edificación hacia las condiciones del contexto E3.0.
- El despliegue de los valores óptimos de aislamiento de la envolvente asociados al contexto E3.0 hace que las demandas para climatización (calefacción y refrigeración) en todos los emplazamientos se igualen mucho en relación a las demandas resultantes de imponer la regulación actual (CTE). Es más, la situación actual asociada a las exigencias de la regulación energética (CTE), en que los emplazamientos de mayor severidad climática de invierno presentan una demanda de climatización considerablemente superior a la de los emplazamientos de elevada severidad climática de verano, llega a invertirse, de tal forma que los emplazamientos de mayor severidad climática de verano son los que presentan una mayor demanda de energía para cubrir los servicios de climatización. Si a esto le añadimos la evolución que cabe esperar en el sistema climático, podemos concluir que la demanda de climatización en el contexto E3.0 va a pasar a estar dominada por la refrigeración en lugar del predominio actual de la calefacción.
- Los espesores de aislamiento (referidos a una conductividad de 0.04 W/mK) óptimo de las paredes elegidos para el contexto E3.0 van desde valores del orden de 6 cm en Málaga, hasta valores de 33 cm en Burgos. Por tanto, así como en los emplazamientos de mayor severidad climática de invierno los espesores de aislamiento óptimos son del orden de los correspondientes al estándar Passive House, en los emplazamientos de menor severidad climática de invierno y dominados por la demanda de refrigeración no tiene sentido emplear espesores de aislamiento tan elevados.
- Las estructuras tarifarias actualmente vigentes conducen a menudo a desincentivar el despliegue de eficiencia en el sector edificación, especialmente al aproximar el edificio hacia los niveles de eficiencia del contexto E3.0. En efecto, en estas condiciones, los términos de potencia de la tarifa eléctrica pasan a dominar completamente el coste específico de la electricidad, de tal forma que un potencial incremento del ahorro queda considerablemente diluido por el incremento del coste específico de la electricidad. Esta gran penalización del término de

potencia todavía tiene menos sentido al tener en cuenta que el despliegue de inteligencia, fundamentalmente asociado (por lo que se refiere a la interacción del edificio con su entorno) a la participación de la demanda en la operación del sistema, está fundamentalmente asociado a la disponibilidad de potencia de regulación, por lo que una potencia contratada más elevada tiene más capacidad de contribuir a la operación del sistema prestando servicios complementarios. En este sentido, el despliegue de inteligencia por la estructura tarifaria pasaría por establecer una tarificación del término de potencia en función de la potencia realmente demandada y de su relación horaria con los requerimientos del sistema eléctrico, y muy especialmente con la capacidad de generación de la potencia renovable instalada en el sistema eléctrico.

- Desde un punto de vista técnico-económico resulta interesante analizar el coste del ahorro (coste del negavatio) para evaluar el óptimo en el despliegue de medidas de eficiencia. Este coste del negavatio es el que debe compararse con el coste de la generación y distribución de energía para decidir a partir de qué momento, y bajo qué situaciones, resulta más apropiado sustituir el ahorro por la generación. En un contexto BAU, una diferencia fundamental entre el coste del negavatio y el de la generación es que así como este segundo se encontrará sometido a una importante inflación incremental, el coste del ahorro proporciona una estabilidad muy superior de sus costes. Sin embargo, en un contexto con generación 100% renovable, también se contiene la tendencia inflacionista del coste de la energía, y además surgen elementos nuevos, como la disponibilidad de electricidad “residual” procedente de los requerimientos de regulación del sistema,

que compiten de forma muy favorable con el coste del negavatio al articularse mediante la integración de la demanda en la operación del sistema.

- En este informe se desarrolla un análisis detallado del coste del negavatio (coste del ahorro) asociado a una de las medidas de eficiencia de mayor coste del ahorro, esto es, el aislamiento de la envolvente del edificio. De este análisis se desprende que los niveles de despliegue de eficiencia asociados a la saturación del beneficio energético de la medida de eficiencia considerada, representan correctamente el nivel óptimo del despliegue de eficiencia desde un punto de vista técnico-económico. Es más, más allá del óptimo técnico-económico, la curva de costes es muy plana, por lo que así como hay una penalización económica importante si nos quedamos cortos en el despliegue de eficiencia, excederse un poco en el despliegue de eficiencia sobrepasando el valor óptimo no conduce a una penalización económica significativa: más vale pecar por exceso que por defecto. De hecho, la introducción de inteligencia en la estructura tarifaria, allana todavía más la curva de costes más allá del valor óptimo del despliegue de eficiencia.
- El coste del negavatio asociado a los niveles óptimos del despliegue de eficiencia correspondiente a incrementar el espesor de aislamiento de la envolvente del edificio (una de las medidas de eficiencia de mayor coste del negavatio), es considerablemente inferior al coste de la energía proyectado para el año 2050, especialmente en el contexto BAU, pero también en el contexto E3.0. Por tanto, podemos concluir que el despliegue de eficiencia queda completamente justificado desde un punto de vista económico.

- Los análisis técnico-económicos asociados al despliegue de eficiencia deben estar basados en parámetros que incluyan la evaluación de costes en el ciclo de vida, de tal forma que no se trunque el beneficio del ahorro conseguido y que no se queden fuera del indicador elementos tan importantes como la inflación incremental de los recursos energéticos. Por tanto, parámetros como el periodo de retorno (payback) de una inversión en eficiencia no resultan adecuados para evaluar el óptimo en el despliegue de esta medida.
- El despliegue de eficiencia asociado al contexto E3.0 conduce a una gran uniformización espacial de la demanda energética de todos los tipos de edificios. De hecho, excepto aquellos edificios con un gran peso de las cargas de proceso (supermercado, hospital, restaurante, y en menor medida hotel) la demanda de energía final se uniformiza bastante entre los distintos tipos de edificios, de tal forma en edificios residenciales, de oficina, comercios, o centros educativos, la demanda correspondiente al contexto E3.0 es bastante parecida y del orden de 20 kWh/m²-a.
- La reducción de demanda de los edificios al pasar del contexto BAU al E3.0 es muy importante, obteniendo para el contexto E3.0 demandas totales de energía final, que en valor promedio de todas las provincias, son para las distintas tipologías de edificio son del 17,9% (residencial unifamiliar), 21,9% (residencial bloque), 13,7% (oficina), 12,4% (comercio), 11,4% (educación), 10,5% (almacén), 16,9% (supermercado), 18,5% (hotel), 21,5% (hospital) y 32,0% (restaurante) de la demanda correspondiente al contexto BAU.
- El escenario BAU desarrollado para el sector edificación en este estudio contiene un

importante despliegue de eficiencia, pudiéndose por tanto interpretar como un BAU optimista que conduce a una valoración conservadora del nivel de ahorro que nos puede proporcionar la transición hacia el contexto E3.0. De hecho, el BAU 2050 desarrollado en este informe es significativamente más eficiente que los BAU 2050 de referencias anteriores. En efecto, el BAU 2050 para el sector edificación residencial representa un ahorro del 5,1% respecto a la demanda del parque de edificios residenciales del año 2007 si se encontrara completamente internalizada su demanda, y un ahorro del 32,5% respecto al parque de edificios residenciales del año 2050 si mantuviera el mismo consumo específico que en el año 2007 (para el caso del parque de edificios no residenciales, este ahorro asciende al 18,6%, y para el conjunto del parque de edificios al 27,9%). Conviene no perder de vista este carácter optimista del BAU al interpretar los resultados de los beneficios asociados a la transición hacia el contexto E3.0.

- La transición al contexto E3.0 nos ofrece un gran potencial de reducción de la demanda del sector edificación: para el año 2050 la demanda de energía final del sector edificación en el contexto E3.0 es un 19,5% de la demanda en el contexto BAU (20,8% en la edificación residencial y 17,4% para la no residencial), y a pesar de que en el contexto E3.0 el sector edificación se encuentra totalmente electrificado, el consumo de electricidad del contexto E3.0 es tan solo un 28,8% del consumo de electricidad en el contexto BAU (30,8% en la edificación residencial y 25,6% para la no residencial). De hecho, la demanda de electricidad por parte del sector edificación para el contexto E3.0 en el año 2050 es tan solo un 70,1% de la demanda de electricidad del sector

edificación en el año 2007 (96,4% en la edificación residencial y 45,7% para la no residencial). Por tanto, podemos concluir que gracias al despliegue de eficiencia por el sector edificación, su integración en el sistema energético vía la electrificación total de la demanda no supone una carga adicional para el sistema eléctrico, sino más bien todo lo contrario si tenemos en cuenta los requerimientos de electricidad de este sector en el año 2050 para el contexto BAU.

- Por lo que respecta a los distintos escenarios de transición desde el contexto BAU al E3.0 analizados para el sector edificación, la transición retardada conduce a un pico de la demanda de energía final entorno al año 2030, del orden del 200% de la demanda en el año 2007. Incluso la transición lineal conduciría a un pico de la demanda entorno al año 2025 del orden del 132% de la demanda de energía final del sector edificación en el año 2007. Por tanto, una transición acelerada desde el contexto BAU al E3.0, como la indicada por el escenario de transición responsable, resulta muy recomendable para limitar el pico de demanda de nuestro sistema energético, con su correspondiente sobredimensionado de la infraestructura energética y su impacto sobre el consumo de recursos y el sistema climático.
- Por lo que respecta al sector industria, la energía solar térmica y la cogeneración con biomasa juegan un papel importante para acotar el consumo de biomasa en este sector una vez desplegadas las medidas de eficiencia y el potencial de la electrificación eficiente mediante bombas de calor.
- En el contexto E3.0, las bombas de calor se introducen de forma importante dentro del sector industrial para la cobertura de la

demanda térmica de los procesos con niveles acotados de temperatura, sacando provecho del potencial de eficiencia y recuperativo de esta tecnología. En su conjunto, las bombas de calor cubren en el contexto E3.0 del orden del 24% de la demanda de energía térmica en el sector industrial, con un peso mucho más importante (81%) dentro de la demanda de baja y media temperatura.

- En el sector industria, la gran diversidad de niveles térmicos de la demanda, la imposibilidad de cubrirlos todos ellos con bombas de calor, y los elevados niveles de eficiencia e inteligencia desplegados en los demás sectores para el contexto E3.0 (que conducen a una limitación del requerimiento de potencia eléctrica instalada y por tanto de disponibilidad de electricidad "residual" procedente de los requerimientos de regulación del sistema eléctrico), hacen que las tecnologías renovables autónomas como la solar térmica y la biomasa adquieran un mayor protagonismo en el contexto E3.0. Dadas las limitaciones del recurso de biomasa y su potencial impacto sobre la ocupación del territorio, hemos planteado un escenario que apura las posibilidades de la solar térmica y que limita la participación de la cogeneración (por su mayor requerimiento de biomasa para cubrir una demanda térmica dada).
- Para el contexto E3.0 del sector industria, la cogeneración con biomasa cubre del orden del 22% de la demanda de energía térmica, mientras que la combustión directa de la biomasa cubre un 11% de la demanda de energía térmica de este sector (localizada en la región de demanda de alta temperatura, donde la combustión directa de la biomasa aporta un 25% de la cobertura de la demanda).

- Para el contexto E3.0 del sector industria, la solar térmica cubre del orden del 21% de la demanda de energía térmica, distribuido en un 19% de la cobertura de la demanda de calor de baja y media temperatura, un 39% de la demanda de calor de media-alta temperatura, y un 10% de la demanda de calor de alta temperatura.
- Los escenarios desarrollados para el resto de subsectores, son considerablemente menos detallados que los correspondientes a los sectores difusos (edificación y transporte), y están básicamente destinados a proporcionar una descripción completa del sector energético. Los niveles de eficiencia asociados al contexto E3.0 para estos otros subsectores son, por tanto, más conservadores, y en términos del ratio entre los consumos de energía final para el contexto E3.0 y el BAU en el año 2050 quedan representados por un 69% para el subsector primario, un 38% para el subsector servicios públicos, y un 80% para el subsector “usos no energéticos” (si bien este último realmente no cae bajo el paraguas de responsabilidad del sistema energético).
- En su conjunto, el despliegue de medidas de eficiencia por todo el sector energético, conduce a una demanda de energía final en el contexto E3.0 para el año 2050 que es un 28% de la demanda del contexto BAU en el año 2050, y un 45% de la demanda de energía final del año 2007.
- Por lo que se refiere a la electrificación directa (sin tener en cuenta la indirecta asociada a la producción de hidrógeno) del sistema energético, ésta crecería ligeramente en el contexto BAU, y pasaría de un 21% en el año 2007 a ser del 26% en el año 2050, mientras que experimentaría un incremento mucho más importante en el contexto E3.0,

pasando a ser del 61% para el año 2050. A pesar de esta gran electrificación, gracias al despliegue de eficiencia, el consumo total de electricidad en el año 2050 para el contexto E3.0 sería tan solo el 114% del correspondiente al año 2007, y el 57% del que tendría el contexto BAU en el año 2050.

- En el caso de optar por proporcionar la cobertura total de la demanda de combustibles del sistema energético en el contexto E3.0 basado en biomasa, sería preciso emplear un 87% del potencial total de biomasa disponible, y un 136% del potencial de biomasa procedente de cultivos energéticos y cultivos forestales de rotación rápida. Estos resultados refuerzan la conclusión de relativa escasez del recurso de biomasa en nuestro país.
- En el caso de optar por proporcionar la cobertura de la demanda de combustibles del sistema energético (excepto la correspondiente a los subsectores industria y usos no energéticos) del contexto E3.0 basándose en hidrógeno procedente de electricidad renovable, la demanda de electricidad en el año 2050 para el contexto E3.0 sería el 111% de la demanda de electricidad del contexto BAU, y el 222% de la demanda de electricidad del sistema energético en el año 2007.

6.2.3 Conclusiones sobre los costes

- Habitualmente, los costes de los distintos tipos de energía final se expresan en unidades totalmente distintas, lo cual dificulta su comparación directa. En este informe, se proporciona abundante información sobre costes de distintas formas de energía, así como de los escenarios de evolución de la mismos que cabe esperar de cara al futuro,

en las mismas unidades de energía para todas las formas de energía.

- Los escenarios de costes de los recursos energéticos no renovables desarrollados en este estudio son conservadores en el sentido de que plantean valores limitados de la inflación incremental a la que se verán sometidos estos recursos. Para que esta situación se materializara, sería preciso que una parte importante del planeta iniciara la transición desde el contexto BAU al E3.0. De permanecer todos estancados en el contexto BAU, la inflación incremental que cabría esperar en estos recursos sería considerablemente superior.
- El escenario adoptado para la evolución de los costes del CO₂, conduce a un coste de 75 €/2007/tCO₂ en el año 2050, planteando un incremento gradual a lo largo del periodo considerado.
- El escenario desarrollado para la evolución del precio del petróleo plantea una inflación incremental decreciente a lo largo del escenario temporal considerado, asociada a la transición creciente de las distintas economías del planeta desde el contexto BAU al E3.0, que conducirían en el año 2050 a unos precios entorno a los 9,1 €/2007/kWh (210 \$/2007/barril). Para otros recursos energéticos, el precio en el año 2050 según los escenarios desarrollados se sitúa en torno a 4,1 €/2007/kWh para el carbón, 10,3 €/2007/kWh para el gas natural industrial, y 17,1 €/2007/kWh para la gasolina de automoción. El estudio también incluye escenarios de coste para la energía nuclear, y para la generación y acumulación de hidrógeno. La mayoría de los escenarios de costes de las tecnologías renovables se adoptan del estudio R100% (GP, 2006).
- Los costes normalizados de generación de electricidad con las tecnologías no renovables para el año 2050 se sitúan en el orden de 26-30 €/2007/kWh_e.
- Por lo que respecta a los costes de la energía, éstos se modifican a lo largo del tiempo, a la baja para el caso de las tecnologías renovables y al alta para las no renovables. Para reflejar el efecto de esta evolución del coste con el tiempo, en este informe, además de presentar escenarios de la evolución temporal de los costes, hemos elaborado dos parámetros adicionales: uno es el coste del mix de generación existente en un año dado, que está configurado por instalaciones puestas en operación a lo largo de los años anteriores (y por tanto con las estructuras de costes de los años anteriores), y el otro es el valor promedio a lo largo del periodo de tiempo considerado del coste del mix de generación existente en cada año. Por lo general, el coste promedio en el periodo de tiempo considerado queda bastante bien caracterizado por el promedio aritmético de los costes de las tecnologías consideradas en el año inicial y final del periodo de tiempo considerado.
- El coste del negavatio, es decir, el coste asociado al despliegue de eficiencia, queda muy por debajo del margen para que el coste de la energía en el contexto E3.0 sea inferior al del contexto BAU. En efecto, si bien la gran mayoría de medidas de eficiencia presentan un coste del negavatio por debajo del 1 €/2007/kWh, el margen disponible para que los costes de la energía en el contexto E3.0 se sitúe por debajo a los del contexto BAU es del orden de 20 €/2007/kWh.

6.2.4 Conclusiones sobre la cobertura de la demanda

- En este informe se acometen análisis de la cobertura de la demanda del total del sistema energético con distintos mix de sistemas de generación, tanto para el contexto E3.0 como para el BAU, se analiza el requerimiento de mecanismos de flexibilidad para garantizar la cobertura de la demanda, y se evalúan los costes totales del sistema energético asociado a cada mix de generación.
- Para el contexto BAU en el año 2050 analizamos dos casos de cobertura de la demanda: la cobertura de la demanda con un mix BAU, y la cobertura de la demanda con un mix-100% renovable (100%R). El sistema eléctrico para el mix BAU, con unos 201 GWe de potencia instalada, produce del orden del 29% de la energía empleada para cubrir la demanda (el resto son combustibles), e implementa un 38% de generación de origen renovable.
- En el caso del mix-100%R, el sistema eléctrico debe generar también la electricidad necesaria para cubrir el grueso de la demanda de combustibles del contexto BAU con hidrógeno producido a partir de electricidad de origen renovable. La gran demanda de combustibles en el contexto BAU conduce al requerimiento de un gran sobredimensionado del sistema eléctrico en relación a la demanda de electricidad directa, lo cual proporciona un importante mecanismo de flexibilidad para la cobertura de la demanda eléctrica, lo que reduce los requerimientos de otros mecanismos de flexibilidad que resultaban mucho más determinantes en el caso de que el sistema de generación 100%R tan solo tuviera que hacerse cargo de la demanda de electricidad directa. En

efecto: la potencia eléctrica instalada para proporcionar la cobertura de la demanda del total del sistema energético del contexto BAU con el mix-100%R es del orden de 1071 GWe, mientras que para la cobertura de la demanda de electricidad directa bastarían del orden de 222 GWe.

- Para el mix-100%R del contexto BAU, el sistema de generación y acumulación de hidrógeno constituye uno de los elementos principales de integración del sistema energético, y permite integrar todo el excedente horario de capacidad de generación eléctrica y acoplar las secuencias temporales de generación renovable y de demanda de combustibles. Para el caso analizado de cobertura de la demanda, el sistema de acumulación de hidrógeno requiere una capacidad del orden de 282 TWh_{H2}, que corresponde a una reserva de unos 72 días. La potencia de generación de hidrógeno necesaria para el mix-100%R del contexto BAU es del orden de los 799 GWe.
- Para el contexto BAU con mix BAU en el año 2050, el coste específico de la energía se ve significativamente incrementado como consecuencia de la inflación de los recursos energéticos no renovables, pasando para el conjunto del sistema energético y en términos normalizados de 10,3 c€/2007/kWh en el año 2007 a 22 c€/2007/kWh en el año 2050. La incorporación de generación renovable en el sistema eléctrico del mix BAU contribuye a contener la inflación en el coste de la electricidad respecto a la experimentada por el resto del sistema energético.
- En el contexto BAU con mix BAU, el coste total del sistema energético en términos normalizados, se incrementa desde 135.558 M€/2007/a en el año 2007 hasta 457.521 M€/2007/a en el año 2050. Por el contrario,

con un mix-100%R el coste total del sistema energético para el contexto BAU se reduciría desde 421.175 M€-2007/a en el año 2007 hasta 215.831 M€-2007/a en el año 2050, y ofrece un gran potencial de reducción de costes a largo plazo. Estos resultados para el mix-100%R incluyen el efecto de los costes asociados a la generación y acumulación de hidrógeno, que en términos de costes para el año 2007 tienen un elevado peso relativo (52%) sobre la estructura de costes total.

- En términos promedio en el periodo de tiempo considerado en este estudio (2007-2050), en el contexto BAU, la opción del mix BAU conduce a un LEC de 16,3 c€/2007/kWh, mientras que la opción del mix-100%R conduce a un LEC de 14,4 c€/2007/kWh. Por tanto, producir el cambio el modelo del sistema de generación desde el mix BAU a un mix 100% renovable, no solo nos da acceso a unos costes del suministro de energía estables y muy inferiores en el futuro, sino que además, en el periodo de implantación del nuevo sistema de generación nos sale más barato (supone un ahorro promedio de 55.556 M€-2007/a). Y a partir del año 2050 hacia adelante, haber acometido este proceso de reconversión del mix BAU hacia el sistema 100% renovable, nos deja en una situación con unos costes estables de la energía final suministrada del orden de 8,9 c€/2007/kWh, frente al escenario al que nos conduciría seguir con el mix BAU con unos costes en 2050 de 22,0 c€/2007/kWh sobre los que todavía cabría esperar una inflación adicional en los años futuros a medida que fura aumentando la escasez de los recursos en los que se basaría nuestro sistema energético.
- Para el caso del contexto E3.0 se han analizado dos casos principales de cobertura

de la demanda. Un caso sin participación de la gestión de la demanda, y otro caso con participación activa de la gestión de la demanda en la operación del sistema energético.

- El gran despliegue de eficiencia asociado al contexto E3.0 conduce a que se vea muy reducido el requerimiento de potencia a instalar en el sistema eléctrico. Para el caso sin gestión de la demanda bastan del orden de 183 GW_e de potencia instalada para alcanzar la cobertura total de la demanda del sistema energético en el año 2050. Para el mix analizado, la capacidad de regulación gestionable (termosolar, hidroeléctrica, hibridación con biomasa de la termosolar y biomasa) asciende al orden de los 130 GW_e, lo cual, junto a la acumulación de hidrógeno, proporciona una gran flexibilidad desde el lado de la oferta como para garantizar la cobertura total de la demanda de forma eficiente (el factor de capacidad total de la potencia instalada es del orden del 38%). Por lo que respecta a la generación y almacenamiento de hidrógeno, el contexto E3.0 también permite una gran reducción en estos requerimientos, y se reduce a 33 TWh_{H₂} (reserva de 102 días) los requerimientos de acumulación para poder aprovechar completamente la electricidad “residual” procedente de la regulación del sistema eléctrico, y con una potencia de generación de hidrógeno de 117 GW_e.
- Los LEC de generación eléctrica para el contexto E3.0 son del mismo orden que los obtenidos para el contexto BAU con mix-100%R, como consecuencia de que para el contexto E3.0 la hibridación termosolar sí que se hace necesaria para la operación del sistema debido a que la baja demanda de hidrógeno no conduce al gran sobredimensionado del sistema eléctrico en relación a la

demanda de electricidad directa (en el contexto E3.0 el sistema eléctrico tiene $SM = 2,25$, mientras que en el contexto BAU con mix-100%R se requeriría $SM = 10,6$ para proporcionar cobertura a la elevada demanda de combustibles). Sin embargo, los costes absolutos del sistema energético son muy inferiores en virtud de la gran reducción de la demanda.

- En el contexto E3.0, la participación activa de la gestión de la demanda, proporciona un incremento de la flexibilidad del sistema energético. En términos de la capacidad de acumulación el incremento es relativamente limitado (13%), pero en términos de la potencia de regulación puesta a disponibilidad del sistema, el incremento es mucho más importante (154%), y tal y como ya mostramos en el estudio R100% (GP, 2006), es precisamente en términos de potencia de regulación en que se expresan los requerimientos de flexibilidad de un sistema eléctrico operando con 100% renovables. Por tanto, la participación de la gestión de la demanda proporciona un importante incremento de la seguridad de suministro. De hecho, al articular la participación activa de la gestión de la demanda en la operación del sistema, la gran disponibilidad de potencia de regulación desde el lado de la demanda, hace que ya no sea preciso recurrir a la hibridación termosolar para proporcionar mecanismos de flexibilidad por el lado de la oferta como sucedía en el contexto E3.0 sin participación de la gestión de la demanda.
- La articulación de la participación de la gestión de la demanda en el contexto E3.0 también proporciona el beneficio de una reducción del orden del 15% en el requerimiento de capacidad de acumulación de hidrógeno, y del 13% en potencia de generación de hidrógeno, que repercuten en una reducción del mismo orden de los LEC asociados al sistema de hidrógeno. Al añadir a estos efectos el de la reducción en la potencia instalada requerida por el sistema eléctrico y la eliminación del requerimiento de hibridación termosolar, la articulación de la participación activa de la demanda en la operación del sistema conduce a una reducción del orden del 25% en el LEC del sistema eléctrico y de hidrógeno para el año 2050.
- La integración de las capacidades de la operación de las capacidades de acumulación eléctrica y de hidrógeno, permite para el contexto E3.0 en el año 2050 con participación activa de la gestión de la demanda, acceder a una reducción adicional del 32% en el requerimiento de potencia de generación de hidrógeno.
- Por lo que se refiere al conjunto del sistema energético en el contexto E3.0 y el año 2050, los LEC resultantes son de 7,5 c€/2007/kWh para el caso sin participación de la gestión de la demanda, y de 6,6 c€/2007/kWh para el caso con participación de la gestión de la demanda, que son respectivamente un 84% y un 74% del LEC del total del sistema energético para el contexto BAU con mix-100%R, y un 34% y 30% del LEC del total del sistema energético para el contexto BAU con mix BAU. Pero las mayores diferencias se producen en términos del coste absoluto del sistema energético, que es donde sale a relucir el efecto del despliegue de eficiencia, de tal forma que para el contexto E3.0 y el año 2050 el coste normalizado anual del conjunto del sistema energético es de 46038 M€/2007/a para el caso sin participación activa de la demanda y 40547 M€/2007/a para el caso con participación activa de la gestión de la demanda, que representan respectivamente un 25% y 22% de los costes absolutos para el contexto BAU con mix-100%R, y

un 10% y 9% de los costes absolutos para el contexto BAU con mix BAU.

- Por lo que se refiere a los LEC promedio en el periodo de tiempo considerado (2007-2050), sin tener en cuenta los costes de la infraestructura de almacenamiento de combustibles, y tomando como referencia el LEC del contexto BAU con mix BAU (16.3 c€/2007/kWh), los LEC del contexto BAU con mix-100%R, del contexto E3.0 sin gestión de la demanda y del contexto E3.0 con gestión de la demanda, son respectivamente del 88,1%, 79,7% y 69,9%.
- Por lo que se refiere al coste absoluto anual normalizado promedio durante el periodo de tiempo analizado (2007-2050), incluidos los efectos de acumulación de hidrógeno, el contexto E3.0 sin participación de la gestión de la demanda conduce a un coste de 102.753 M€/2007/a, un 33% del valor correspondiente al contexto BAU con mix BAU, mientras que el contexto E3.0 con participación de la gestión de la demanda conduce a un coste de 93.783 M€/2007/a, un 30% del valor correspondiente al contexto BAU con mix BAU. Resulta interesante apuntar que importe dedicado a las primas a las energías renovables en el año 2009 es del orden del 1,2% del ahorro anual promedio en el periodo 2007-2050 correspondiente a pasar del contexto BAU al contexto E3.0.
- El sobrecoste disponible para el despliegue de eficiencia por el sistema energético en el caso de emplear mix de generación 100%R se reduce a medida que avanza el tiempo, como consecuencia de la reducción de costes de las tecnologías renovables. Esta situación indica la conveniencia de acelerar tanto como sea posible el despliegue de las medidas de eficiencia, pues en los primeros

años proporcionan un mayor beneficio económico. De cualquier forma, los costes disponibles para el despliegue de eficiencia, evaluados a partir de la diferencia de costes entre el sistema energético en el contexto BAU y el del E3.0, conducen a valores muy superiores (15-25 c€/2007/kWh) a los costes promedio del negavatio correspondiente al conjunto de medidas de eficiencia a aplicar sobre el sistema energético (del orden o inferiores a 1 c€/2007/kWh).

- El beneficio económico asociado a acelerar la transición del contexto BAU al E3.0 es muy importante, con el escenario retardado conduce a un pico de coste anual del sistema energético del 235% del coste correspondiente al año 2007, mientras que el escenario responsable limita este pico a un 112%. El coste anual promedio en el periodo 2007-2050 correspondiente al escenario de transición retardado, resulta ser el 211% del coste promedio correspondiente al escenario responsable: retrasar el proceso de transición nos puede conducir a duplicar los costes del sistema energético en el periodo de tiempo considerado.



Greenpeace

Energía 3.0

Un sistema energético basado
en inteligencia, eficiencia
y renovables 100%





imagen

Detalle de la iluminación
vial que utiliza LED.

© PEDRO ARMESTRE

Bibliografía

7

Abanades García, J.C.; Cuadrat Prats, J.M.; de Castro Muñoz de Lucas, M.; Fernández García, F.; Gallastegui Zulaica, C.; Garrote de Marcos, L.; Jiménez Herrero, L.M.; Juliá Brugués, R.; Losada Rodríguez, I.J.; Monzón de Cáceres, A.; Moreno Rodríguez, J.M.; Pérez Arriaga, J.I.; Ruiz Hernández, V.; Sanz Sánchez, M.J.; Vallejo Calzada, R.; *El cambio climático en España. Documento resumen*, Informe para el presidente del gobierno elaborado por expertos en cambio climático, noviembre, 2007.

AGECC, *Energy for a sustainable future*, The secretary-general's advisory group on energy and climate change (AGECC), United Nations, April, 2010.

AIE, *Energy efficiency requirements in building codes. Energy efficiency policies for new buildings*, March, 2008-1

AIE, *World Energy Outlook 2008*, 2008-2.

AIE, *Energy Technology Perspectives 2008 — Scenarios and Strategies to 2050*, IEA/ OECD, 2008-3.

AIE, *Empowering Variable Renewables. Options for Flexible Electricity Systems*, OECD/IEA, 2008-4.

AIE, *World Energy Outlook 2009*, 2009.

AIE, *Energy Technology Perspectives 2010 — Scenarios and Strategies to 2050*, IEA/ OECD, 2010.

Amos, W.A., *Costs of Storing and Transporting Hydrogen*, NREL/TP-570-25106, 1998.

Archer, C.L.; and Jacobson, M.Z.; *Supplying Baseload Power and Reducing Transmission Requirements by Interconnecting Wind Farms*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 46, pp.1701-1717, 2007.

ASHRAE, *ASHRAE Vision 2020. Producing Net Zero Energy Buildings. Providing tools by 2020 that enable the building community to produce market-viable NZEBs by 2030*, January, 2008.

Bandivadekar, A.; Bodek, K.; Cheah, L.; Evans, C.; Groode, T.; Heywood, J.; Kasseris, E.; Kromer, M.; Weiss, M.; *On the road in 2035*, MIT, 2008.

Bjureby, E., *Energy Scenarios- A comparative analysis*, Greenpeace, 2008.

Boardman, B.; Darby, S.; Killip, G.; Hinnells, M.; Jardine, C. N.; Palmer, J. and Sinden, G.; *40% house*, Environmental Change Institute, University of Oxford, 2005.

Braun, J.E., *Reducing Energy Costs and Peak electrical demand through optimal control of building thermal storage*, ASHRAE Trans., 96 (2), pp. 876-888, 1990.

Braun, J.E., *Load control using building thermal mass*, ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol.125, pp. 292-301, August, 2003.

Brunet, M.; Casado, M.J.; de Castro, M.; Galán, P.; López, J.A.; Martín, J.M.; Pastor, A.; Petisco, E.; Ramos, P.; Ribalaygua, J.; Rodríguez, E.; Sanz, I.; Torres, L.; *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*, AEMET, 2009.

Burgess, J.; Nye, M.; *Re-materialising energy use through transparent monitoring systems*, Energy Policy 36 (2008) 4454–4459, 2008.

Callaway, D.S., *Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy*, Energy Conversion and Management (2009), doi:10.1016/j.enconman.2008.12.012.

CCC, *Meeting Carbon Budgets – the need for a step change*, Progress report to Parliament, Committee on Climate Change, October, 2009.

Chester, M., *Environmental life cycle assessment of passenger transportation*, University of California, Transportation Research Conference, February, 2007.

Coll-Mayor, D.; Paget, M.; Lightner, E.; *Future intelligent power grids: Analysis of the vision in the European Union and the United States*, Energy Policy 35 (2007) 2453 – 2465, 2007.

Crawley, D.; Pless, S.; Torcellini, P.; *Getting to Net Zero*, NREL/JA-550-46382, September, 2009.

De Castro, M.; Martín-Vide, J.; and Alonso, S.; *The climate of Spain: past, present and scenarios for the 21st century*, en *A Preliminary General Assessment of the Impacts in Spain Due to the Effects of Climate Change*, UCLM, Ministerio de Medio Ambiente, 2005.

DECC, *Smarter Grids: The Opportunity*, Department of Energy and Climate Change, UK, December, 2009.

Defra, DECC, *2009 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting*, Produced by AEA for the Department of Energy and Climate Change (DECC) and the Department of Environment, Food and Rural Affairs (Defra), 2009.

Deru, M.; Field, K.; Studer, D.; Benne, K.; Griffith, B.; Torcellini, P.; Halverson, M.; Winiarski, D.; Liu, B.; Rosenberg, M.; Huang, J.; Yazdanian, M.; Crawley, D. (2009).

Díaz Carazo, J.; Linares Llamas, P.; López-Peña Fernández, A.; Pérez Arriaga, J.I.; *Observatorio de energía y sostenibilidad en España. Informe basado en indicadores*, edición 2009.

ECEEE (European Council for an Energy Efficient Economy), *Steering through the maze #2: Net zero energy buildings: definitions, issues and experience*, September, 2009.

ECEEE (European Council for an Energy Efficient Economy), *Steering through the maze #1: Your ECEEE guide to the recast of the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*, March, 2010.

ECF, *Roadmap 2050: A practical guide to a prosperous low carbon Europe*, April, 2010.

EDR, *How Low Can You Go? Setting Performance Targets for the Design of High-Performance, Low-Energy Buildings*, e-NEWS Issue 62, January, 2009.

Edwards, J.L.; and Marnay, C.; *Thermally Activated Cooling: A Regional Approach for Estimating Building Adoption*, LBNL-57954, 2005.

EEA, *Climate for a transport change. TERM 2007: indicators tracking transport and environment in the European Union*, EEA report nº1/2008, 2008.

EEA, *Transport at a crossroads. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union*, EEA report nº 3/2009, 2009.

Energy Efficiency Watch, *Promoting Energy Efficiency in Europe. Insights, Experiences and Lessons learnt from the National Energy Efficiency Action Plans*, 2009.

Estevan, A.; Sanz, A.; *Hacia la reconversión ecológica del transporte en España*, Bakeaz, CCOO, Libros la Catarata, 1996.

Eurostat, *Pocketbook: Energy, Transport and Environment indicators*, March, 2009-1.

Eurostat, *Statistical year book: Europe in figures*, September, 2009-2.

Fundación Entorno, *Hacia la eficiencia energética: Una apuesta para la empresa española*, Consejo Empresarial Español para el Desarrollo Sostenible, 2009.

García Álvarez, A., *Incidencia del tren de alta velocidad en el consumo energético y emisiones del sector transporte*, VI Semana de la Ciencia, Universidad Pontificia Comillas, 2006.

García Álvarez, A., Martín Cañizares, M.P., *Estandarización de los consumos energéticos y emisiones de los trenes de viajeros*, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, mayo, 2007-1.

García Álvarez, A., *Dinámica de los trenes en alta velocidad*, Documentos de explotación técnica y económica de ferrocarriles, noviembre, 2007-2.

García-Casals, X., *Criterios para incorporar la cogeneración en un sistema de generación eléctrica limpio*, informe elaborado desde el Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad Pontificia Comillas para Greenpeace España, IIT-03-062I, octubre, 2003.

García-Casals, X., *Regulación y certificación energética de edificios: Asignatura pendiente en España*, Instituto de Investigaciones Tecnológicas, IIT-04-022I, mayo 2004-1.

García-Casals, X., *Calefacción solar por precalentamiento de bomba de calor: Análisis y simulación dinámica*, XII Congreso Ibérico y 427 VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar Vigo, España, 14-18, septiembre, 2004-2.

García-Casals, X., *Consumo energético en la edificación: Necesidad de legislación apropiada*, Ecohabitar, vol. 1(2), pp. 32-34, 2004-3.

García-Casals, X., *Análisis energético de la vivienda octagonal de Torremocha: Valoraciones de sostenibilidad*, IIT-05-001I, enero, 2005-1.

García-Casals, X., *El Código Técnico de la Edificación y la certificación energética de edificios: grandes limitaciones en las propuestas actuales*, ERA SOLAR, vol. 1(126), pp.18-31, 2005-2.

García-Casals, X., *Solar cooling economic considerations: Centralized versus decentralized options*, ASME Journal of solar energy engineering, vol. 128, pp. 231-236, May, 2006-1

García-Casals, X., *Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences*, Energy and Buildings, vol.38, pp.381-392, 2006-2.

García-Casals, X., *Potencial de la ingeniería bioclimática y las renovables en el sector edificación*, Era Solar, nº 137, pp. 70- 83, marzo/abril, 2007-1.

García-Casals, X., *El ahorro y la eficiencia energética en el sector de la edificación*, en Pérez Arriaga, J.I.; García Casals, X.; Mendiluce Villanueva, M.; Miras Salamanca, P.; Sánchez de Tembleque, L.J.; *La gestión de la demanda de la energía en los sectores de la edificación y el transporte*, Fundación Alternativas, documento de trabajo 114/2007, 2007-2.

García Casals, X., *Apuntes sobre el estado actual de la certificación energética de edificios*, Grupo de trabajo GT-EEDF, 9º CONAMA (Congreso Nacional de Medio Ambiente), diciembre, 2008-1.

García Casals, X., *Problemática de las referencias variables en la certificación y regulación energética de edificios. Argumentos para revisar conceptos*, en *Certificación de*

eficiencia energética: La calificación de los edificios, Grupo de trabajo GT-EEDF, 9º CONAMA (Congreso Nacional de Medio Ambiente), diciembre, 2008-2.

García Casals, X., *Efecto del dimensionado de los equipos en la certificación energética de edificios. Argumentos para revisar conceptos*, Grupo de trabajo GT-EEDF, 9º CONAMA (Congreso Nacional de Medio Ambiente), diciembre, 2008-3.

García-Casals, X., *Escenarios para un modelo basado en 100% de energía renovables para el 2050*, en *Un nuevo modelo energético para España*, Fundación Ideas para el Progreso, mayo, 2009-1.

García-Casals, X., *Propuesta línea negocio en movilidad sostenible*, informe para la Fundación Navarra para la Diversificación, mayo, 2009-2.

García-Casals, X., *Propuesta línea negocio en edificación sostenible*, informe para la Fundación Navarra para la Diversificación, junio, 2009-3.

García-Casals, X., *Propuesta línea negocio en gestión de la demanda y la generación distribuidas*, informe para la Fundación Navarra para la Diversificación, junio, 2009-4.

García-Casals, X., *Aplicacions de les energies renovables al sector de l'edificació*, Nota d'Economia, Energías Renovables: Presente y Futuro, Nota d'Economia nº 95-96, pp177-202, Gobierno de Cataluña, Departamento de Economía y Finanzas, 2010.

García-Casals, X., 'Certificación energética de edificios en España: ¿a quien queremos engañar?', *Era Solar*, nº160, pp. 26-40, enero-febrero, 2011.

Genovese, J.; Harg, K.; Paster, M.; Turner, J.; *Current (2009) State-of-the-Art Hydrogen*

Production Cost Estimate Using Water Electrolysis, Independent Review Published for the U.S. Department of Energy Hydrogen Program, NREL/BK-6A1-46676, September, 2009.

Germany, E., *Market introduction perspectives of innovative technologies supporting integration of RES-E*, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, January, 2008.

Global Footprint Network, *National Footprint Accounts*, 2010.

Goran Strbac, *Demand side management: Benefits and challenges*, Energy Policy 36 (2008) 4419–4426, 2008.

Grant, N.; Clarke, A.; *Biomass - a burning issue*, AECB (www.aecb.net), 2010.

Greenpeace España, *Una propuesta para incorporar mecanismos de gestión de la demanda y ahorro energético en la Ley de Ordenación del Sistema Eléctrico*, Greenpeace, marzo, 1994.

Greenpeace España, *Gestión de la demanda eléctrica en España: Análisis de una experiencia y propuestas de consolidación*, Greenpeace, enero, 1996.

Greenpeace España, *Renovables 2050: Un informe sobre el potencial de las energía renovables en la España peninsular*, Greenpeace, 2005.

Greenpeace España, *Renovables 100%: Un sistema eléctrico renovable para la España peninsular y su viabilidad económica*, Greenpeace España, octubre, 2006.

Greenpeace España, *Transporte: el motor del cambio climático*, Greenpeace, septiembre, 2009.

Greenpeace Internacional, *The True Cost of coal*, 2008.

Greenpeace Internacional, *Energy [R]evolution vs. IEA World Energy Outlook scenario 2009*, 2009.

Greenpeace Internacional, *EU Energy [R]evolution - EU Energy roadmaps compared*, julio, 2010.

Greenpeace Internacional, *La batalla de las redes: Cómo Europa puede alcanzar un objetivo 100% renovable y eliminar progresivamente la energía sucia*, Greenpeace, Energynautics, febrero, 2011.

Greenpeace Internacional, EREC, *Energy [R]evolution. A sustainable global energy outlook*, 2008.

Greenpeace Internacional, EREC, *[R]enovables 24/7: La infraestructura necesaria para salvar el clima*, noviembre, 2009.

Greenpeace Internacional, EREC, *Energy [R]evolution. A sustainable world energy outlook*, 2010.

Greenpeace Internacional, GWEC, *Global Wind Energy Outlook 2008*, 2008.

Greenpeace Internacional, GWEC, *Global Wind Energy Outlook 2010*, 2010.

Greenpeace Internacional, EPIA, *Solar Generation V-2008*, 2008.

Greenpeace Internacional, EPIA, *Solar Generation VI-2010*, 2010.

Griffith, B.; Torcellini, P.; and Long, N.; Crawley, D.; and Ryan, J.; *Assessment of the Technical Potential for Achieving Zero-Energy Commercial Buildings*, Proceedings of the 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in

Buildings, August 13-18, 2006 in Pacific Grove, California, August, 2006.

Griffith, B.; Torcellini, P.; Long, N.; Crawley, D.; Ryan, J. ; *Assessment of the Technical Potential for Achieving Zero-Energy Commercial Buildings*, Technical Report NREL/TP-550-41957' December, 2007.

GTSP, *End use energy technologies: A core element of a global energy technology strategy to address climate change*, 2007.

Guerrero, R.; Marrero, G.; Martínez-Duart, J.M.; Puch, L.A.; *Biocombustibles líquidos: Situación actual y oportunidades de futuro para España*, DD 19/2010, Fundación Ideas para el Progreso, 2010.

Hacker, F.; Harthan, R.; Matthes, F.; Zimmer, W.; *Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe - Critical Review of Literature*, European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC), ETC/ACC Technical Paper 2009/4, July, 2009.

Hale, E.; Leach, M.; Hirsch, A.; Torcellini, P.; *General Merchandise 50% Energy Savings. Technical Support Document*, Technical Report NREL/TP-550-46100 September, 2009-2.

Heiple, S.; and Sailor, D.J.; *Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles*, Energy and Buildings, Volume 40, Issue 8, Pages 1426-1436, 2008.

Hendron, R.; Anderson, R.; Judkoff, R.; Christensen, C.; Eastment, M.; Norton, P.; Reeves, P.; Hancock, E.; *Building America Performance Analysis Procedures*, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-550-35567, June, 2004.

Hendron, R.; Engebrecht, C.; *Building America Research Benchmark Definition*, Nacional Renewable Energy Laboratory, Technical Report, NREL/TP-550-47246, January, 2010.

Howarth, R.W.; and Bringezu, S.; editors, *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use*, Proceedings of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) International Biofuels Project Rapid Assessment, 22-25 September 2008, Gummersbach, Germany, 2009.

HPTCJ, *Heat pumps: Long awaited way out of global warming*, Heat pump and energy storage technology center of Japan, 2009.

Huang, Y.J.; Brodrick, J.; *A Bottom-Up Engineering Estimate of the Aggregate Heating and Cooling Loads of the Entire US Building Stock*, Building Industry Trends, pp 10.135-10.148, 2000.

IDAE, *Calor solar para procesos industriales-Proyecto POSHIP*, 2001.

IDAE, *Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012. Plan de Acción 2008-2012*, julio, 2007.

IMF, *World Economic Outlook 2008. Financial Stress, Downturns, and Recoveries*, October, 2008.

Isaac, M.; Detlef P.vanVuuren, *Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change*, Energy Policy 37 (2009) 507-521, 2009.

Itron, Inc., *California commercial end-use survey*, CEC-400-2006-005, March, 2006.

J.M. Fernández de Mata, M. Vollbrecht, *Ahorro y eficiencia energética. El enfoque demanda de*

la planificación eléctrica para España, Greenpeace, 1991.

Jackson, T., *Prosperity without growth? The transition to a sustainable economy*, Sustainable Development Commission, 3/2009.

Jameson, Ch.; Sargent, R.; *Building a better future: Moving Toward Zero Pollution with Highly Efficient Homes and Businesses*, PennEnvironment Research & Policy Center, April, 2009.

Jarnagin, R.E.; Liu, B.; Winiarski, D.W.; McBride, M.F.; Suharli, L.; Walden, D.; *Technical Support Document: Development of the Advanced Energy Design Guide for Small Office Buildings*, Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-16250, 2006.

Jensen, O.M.; Wittchen, K.B.; Engelund Thomsen, K.; *Towards very low energy buildings: Energy saving and CO2 emission reduction by changing European building regulations to very low energy standards*, Danish Building Research Institute, Aalborg University, 2009.

Jentsch, M.F.; Bahaj, A.S.; James, P.A.; *Climate change future proofing of buildings - Generation and assessment of building simulation weather files*, Energy and Buildings 40 (2008) 2148-2168, 2008.

Jiang, W.; Gowri, K.; Lane, M.D.; Thornton, B.A.; Rosenberg, M.I.; Liu, B.; Project Manager, *50% Energy Savings Design Technology Packages for Highway Lodging Buildings. Technical Support Document*, Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-18773, DOE, September, 2009-4.

Kampman, B.; Leguijt, C.; Bennink, D.; Wielders, L.; Rijkee, X.; de Buck, A.; Braat, W.; *Give way to green driving. Development of policy recommendations to harvest the*

potential of electric vehicles, Delft, CE Delft, November, 2009.

Kampman, B.; Leguijt, C.; Bennink, D.; Wielders, L.; Rijke, X.; de Back, A.; Braat, W.; *Green Power for Electric Cars: Development of policy recommendations to harvest the potential of electric vehicles*, Commissioned by: Transport & Environment, Friends of the Earth Europe and Greenpeace European Unit. Delft, CE Delft, January, 2010.

Kendall, G., *Plugget in. The end of the oil age*, WWF, 2008.

Koizumi, S., *Energy efficiency of air conditioners in developing countries and the role of CDM*, IEA information paper, 2007.

Kottenstette, R.; Cotrell, J.; *Hydrogen Storage in Wind Turbine Towers: Cost Analysis and Conceptual Design*, NREL/CP-500-34851, 2003.

Leach, M.; Hale, E.; Hirsch, A.; Torcellini, P.; *Grocery Store 50% Energy Savings. Technical Support Document*, Technical Report NREL/TP-550-46101, September, 2009-3.

Lechón, Y.; Cabal, H.; Lago, C.; de la Rúa, C.; Sáenz, R.M.; Fernández, M.; *Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase-I: Análisis del ciclo de vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina*, Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Educación y Ciencia CIEMAT, 2005.

Lechón, Y.; Cabal, H.; de la Rúa, C.; Lago, C.; Izquierdo, L.; Sáenz, R.M.; F. San Miguel, M.; *Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase-II: Análisis del ciclo de vida comparativo del biodiésel y del diésel*, Ministerior de Medio Ambiente, Ministerio de Educación y Ciencia CIEMAT, 2006.

Lehmann, H.; Kruska, M.; Ichiro, D.; Ohbayashi, M.; Takase, K.; Tetsunari, L.; *Energy Rich Japan*, Institute for Sustainable Solutions and Innovations (ISUSI), 2003.

Lehmann, H., *Supplying Europe with Solar Energy*, 2007.

Lund, P.D.; *The energy storage problem in low energy buildings*, Solar Energy Vol. 52, No. 1, pp. 67-74, 1994.

Lund, H.; Kempton, W.; *Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G*, Energy Policy 36 (2008) 3578– 3587, 2008.

Lund, H.; Mathiesen, B.V.; *Energy systems analysis of 100 per cent renewable energy systems. The case of Denmark year 2030 and 2050*, Aalborg University, 2008.

MacKay, J. C. D., *Sustainable Energy without the hot air*, v 3.5.2, November, 2008.

Makhijani, A.; *Carbon-Free and Nuclear-Free: A Roadmap for U.S. Energy Policy*, Institute for Energy and Environmental Research, March, 2008-1.

Makhijani, A., *Nuclear isn't necessary*, Nature reports climate change, Vol. 2, October, 2008-2.

Martínez Linares, J., *La crisis del clima: Evidencias del cambio climático en España*, Greenpeace España, mayo, 2009.

Massachusetts Zero Net Energy Buildings Task Force, *Getting to Zero. Final Report of the Massachusetts Zero Net Energy Buildings Task Force*, March 11, 2009.

McDonald, J., *Adaptive intelligent power systems: Active distribution networks*, Energy Policy 36 (2008) 4346–4351, 2008.

McKinsey & Company, *Pathways to a low carbon economy*, McKinsey & Company, 2009.

Meter, S.; Doleschek, A.; Lehmann, H.; Mirales, J.; Puig, J.; Corominas, J.; Garcia, M.; *Solar Catalonia. A Pathway to a 100% Renewable Energy System for Catalonia*, iSuSI, WCRE, Fundació Terra, Eurosolar, Ecoserveis, 2007.

MINECO, IDAE, *Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012. Sector Transporte*, noviembre 2003.

Ministerio de Fomento, *Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte 2005-2020. Documento propuesta*, diciembre, 2004.

Ministerio de Fomento, *Anuario 2004*, 2005.

Ministerio de Fomento, *Anuario 2005*, 2006.

Ministerio de Fomento, *Anuario Estadístico 2006*, 2007.

Ministerio de Fomento, *Anuario Estadístico 2007*, 2008-1.

Ministerio de Fomento, *Cifras 2008*, 2008-2.

Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente, *Estrategia Española de Movilidad Sostenible*, abril, 2009.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. *La Energía en España 2009*, 2009.

Ministerio de Medio Ambiente y Medios Rural y Marino. *Anuario estadístico 2009*, 2009.

Moore, T., *Simulation of radiant cooling performance with evaporative cooling sources*, CBE, University of California, Berkeley, 2008.

NBC Foundation, *Zero Carbon Compendium. Who's doing what in housing worldwide*, June, 2009.

New Building Institute, *Advanced buildings. Core performance Guide: A prescriptive program to achieve significant, predictable energy savings in new commercial buildings*, Vermont Edition, 2008.

Newell, K., *Low Cost, High Efficiency, High Pressure Hydrogen Storage*, DOE Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program Review, May, 2004.

Nielsen, K., *Thermal Energy Storage. A State-of-the-Art*, A report within the research program Smart Energy-Efficient Buildings at NTNU and SINTEF 2002-2006, 2003.

Nieto, J.; Linares, P. (dirección y redacción final); *Cambio Global España 2020/50. Energía, economía y sociedad*, Fundación Conama, Centro Complutense de Estudios e Información Medioambiental, febrero, 2011.

Olavaria, E.P. (coord), *La Microrred. Una alternativa de Futuro para un suministro energético integral*, TECNALIA Corporación tecnológica, 2008.

Outhred, H.; Bull, S.R.; Kelly, S.; *Integrating Renewable Energy into Competitive Electricity Industries*, REIL, 2007.

Papagiannis, G.; Dagoumas, A.; Lettas, N.; Dokopoulos, P.; *Economic and environmental impacts from the implementation of an intelligent demand side management system at the European level*, Energy Policy, vol. 36, pp 163-180, 2008.

Parlamento Europeo, *Plan de acción para la eficiencia energética: realizar el potencial* (2007/2106 (INI)), Resolución del Parlamento Europeo, de 31 de enero de 2008.

Pérez Arriaga, J.I.; Moreno Romero, A. (coordinadores); *La contribución de las TIC a la sostenibilidad del transporte en España*,

Real Academia de Ingeniería, septiembre, 2009.

Pérez Martínez, P.J.; Monzón de Cáceres, A.; *Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión*, Observatorio Medioambiental, vol. 11, pp.127-147, 2008.

Peter, S.; Lehmann, H.; *Renewable Energy Outlook 2030. Energy Watch Group Global Renewable Energy Scenarios*, Energy Watch Group, Ludwig-Boelkow-Foundation, 2007.

PriceWaterhouseCoopers LLP, PIK, IIASA, ECF, *100% Renewable electricity. A roadmap to 2050 for Europe and North Africa*, PriceWaterhouseCoopers LLP, 2010.

PW Consulting, *Planificación energética para las Islas Baleares. Una propuesta basada en la demanda*, Greenpeace España, julio, 1996.

Ramos, J.J., *Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa. Balance del primer año*, the Bioenergy, nº9, oct-2010, 2010.

REN21, *Renewables 2007. Global Status Report*, 2007.

Roberts, S.; *Effects of climate change on the built environment*, Energy Policy 36 (2008) 4552–4557, 2008.

Rodríguez López, B., *Más en menos tiempo. 9.6 M pasajeros viajaron en 2008 por los nuevos corredores e alta velocidad*, Revista Ministerio Fomento, nº 581, febrero, 2009.

Rong, F.; Clarke, L.; Smith, S.; *Climate Change and the Long-Term Evolution of the U.S. Buildings Sector*, PNNL-16869, Pacific Northwest National Laboratory, 2007.

Santacana, M.; Pon, D.; Arto, I.; Fontanillas, M.; Pon, J.; *Las emisiones de gases de efecto invernadero desde la perspectiva del consumo*

en una economía global. Experiencia piloto en el mediterráneo. Estudio de caso: España, Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL), 2008.

Schoenung, S.M., *Hydrogen Energy Storage Comparison*, DE-FC36-96-G010140, A003, 1999

Sezgen, O.; and Koomey, J.G.; *Interactions between lighting and space conditioning energy use in u.s. commercial buildings*, LBNL-39795, 1998.

Shell, *Responsible energy, The Shell Sustainability Report*, 2007.

SRU, *Pathways towards a 100% renewable electricity system*, SRU German Advisory Council on the Environment, January, 2011.

Staffell, I., *A review of domestic heat pump coefficient of performance*, April, 2009.

Stefan, P.; Lehmann, H.; Puig, J.; Garcia, M.; *Solar Catalonia II. A Pathway to a 100% Renewable Energy System for Catalonia. A simulation of Catalan electric system based on the analysis of the hourly meteorological data and electricity load's profiles for 2007*, Eurosolar, WCRE, iSUSI, Ecoserveis, 2009.

Steinberger, J.K.; Niel, J.; Bourg, D.; *Profiting from negawatts: Reducing absolute consumption and emissions through a performance-based energy economy*, Energy Policy 37(2009) 361–370, 2009.

Takashi Y., *Heat pumps the trump card in fight against global warming*, The Japan Journal, October, 2006.

The Climate Group, *Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*, 2008

The Royal Academy of Engineering, *Generating the future: UK energy systems fit for 2050*, The Royal Academy of Engineering, March, 2010.

Thompson, J.R.; McConnell, R.D.; Mosleh, M.; *Cost analysis of a concentrator photovoltaic hydrogen production system*, International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, 1-5 May 2005, Scottsdale, Arizona (NREL/CD-520-38172), 2005.

Thornton, B.A.; Wang, W.; Lane, M.D.; Rosenberg, M.I.; Liu, B.; Project Manager, *50% Energy Savings Design Technology Packages for Medium Office Buildings. Technical Support Document*, Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-18774, DOE, September, 2009-1.

TNO - Science and Industry, RWTH - Institute for High Voltage Technology, ECN - Policy Studies, *RETRANS: Opportunities for the Use of Renewable Energy in Road Transport. Policy Makers Report*, IEA- Renewable Energy Technology Development, March, 2010.

Torcellini, P.; Pless, S.; and Deru, M.; Crawley, D.; *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*, 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, pp. 3.275-3.286, 2006.

Torcellini, P.; Deru, M.; Griffith, B.; Benne, K.; Halverson, M.; Winiarski, D.; Crawley, D.B.; *DOE Commercial Building Benchmark Models*, Conference Paper NREL/CP-550-43291, July, 2008.

Tröster, E.; Kuwahata, R.; Ackermann, T.; *European grid study 2030/2050*, Energynautics, January, 2011.

UE, *Libro Blanco: La política europea de transportes de cara al 2010: La hora de la verdad*, 2002.

UE, *Por una Europa en movimiento. Movilidad sostenible para nuestro continente*, revisión intermedia del Libro Blanco, 2006.

UE, *Green paper: Towards a new culture for urban mobility*, 2007.

USDOE, *Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program*, 2007.

USDOE, *The smart grid: An introduction. How a smarter grid works as an enabling engine for our economy, our environment and our future*, prepared for the U.S. Department of Energy by Litos Strategic Communication under contract No. DE-AC26-04NT41817, Subtask 560.01.04, 2009-1.

USDOE, *Consumer advocates. What the smart grid means to americans*, prepared for the U.S. Department of Energy by Litos Strategic Communication under contract No. DE-AC26-04NT41817, Subtask 500.01.02, 2009-2.

USDOE, *Policymakers. What the smart grid means to americans*, prepared for the U.S. Department of Energy by Litos Strategic Communication under contract No. DE-AC26-04NT41817, Subtask 500.01.02, 2009-3.

USDOE, *Regulators. What the smart grid means to americans*, prepared for the U.S. Department of Energy by Litos Strategic Communication under contract No. DE-AC26-04NT41817, Subtask 500.01.02, 2009-4.

USDOE, *Utilities. What the smart grid means to americans*, prepared for the U.S. Department of Energy by Litos Strategic Communication under contract No. DE-AC26-04NT41817, Subtask 500.01.02, 2009-5.

USDOE, *Technology providers. What the smart grid means to americans*, prepared for the U.S. Department of Energy by Litos Strategic

Communication under contract No. DE-AC26-04NT41817, Subtask 500.01.02, 2009-6.

USDOE, *Commercial Building Research Benchmarks for Commercial Buildings*, Washington, DC: U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, versión marzo, 2010.

Vad Mathiesen, B.; Lund, H.; Karlsson, K.; *The IDA climate plan 2050. Background report*, The Danish Society of Engineers, IDA, August, 2009.

Vattenfall, AB, *Global mapping of greenhouse gas abatement opportunities up to 2030*, Vattenfall, 2007.

Ventosa, J.R., *Menos humos, más salud. El Gobierno da luz verde a la estrategia española de movilidad sostenible*, Revista Ministerio de Fomento, nº585, junio 2009.

WBCSD, *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability*, The sustainability mobility project, World Business Council for Sustainable Development, 2004.

WBCSD, *Energy Efficiency in Buildings. Business realities and opportunities*, World Business Council for Sustainable Development, 2008.

WBCSD, *Energy Efficiency in Buildings. Transforming the market*, World Business Council for Sustainable Development, April, 2009-1.

WBCSD, *Mobility for development*, World Business Council for Sustainable Development, 2009-2.

Weiss, W.; Bergmann, I.; Faninger, G.; *Solar Heat Worldwide. Markets and contributions to energy supply in 2006*, Ed. 2008.

Willstedt Mesa, H., *Ideas para un transporte sin petróleo en 2050*, en *Un nuevo modelo*

energético para España, Fundación Ideas para el Progreso, mayo, 2009.

Woolf, T.; Mickle, C.; *Planificación integrada de recursos en Europa. Aplicación a España*, Greenpeace, agosto, 1993.

Woyte, A.; De Decker, J.; Van Thong, V.; *A North Sea electricity grid [r]evolution*, 3E, Greenpeace, September, 2008.

WWF, Ecofys, OMA, *The energy report. 100% renewable energy for 2050*, February, 2011.

WWF, GFN, ZSL, *Living Planet Report 2010*, 2010.



Activando la [R]evolución energética en la España peninsular

www.revolucionenergetica.es

GREENPEACE

Greenpeace es una organización independiente que usa la acción directa no violenta para exponer las amenazas al medio ambiente y busca soluciones para un futuro verde y en paz.

greenpeace.es