

Energía 3.0

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





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 plantear 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 difícil 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 del 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 cli-

matización 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 encuentren 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 c€-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 c€-2007/kWh para el carbón, 10,3 c€-2007/kWh para el gas natural industrial, y 17,1 c€-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 c€-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 c€-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 c€-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 GW_e 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 GW_e, mientras que para la cobertura de la demanda de electricidad directa bastarían del orden de 222 GW_e.

- 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 GW_e.
- 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 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 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 dónde 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.

