

Escenarios energéticos sostenibles a medio y largo plazo

Helena Cabal
Yolanda Lechón

CIEMAT

La energía es fundamental para el desarrollo de la economía y la garantía del bienestar social de un país. El sistema energético ha de ser compatible con un desarrollo sostenible, esto es, respetuoso con el medio ambiente, que garantice la seguridad en el suministro y contribuya al aumento de la competitividad de la economía. Estos tres principios quedan así reflejados en la Ley 2/2011 de Economía Sostenible (Título III sobre Sostenibilidad medioambiental, Capítulo I Modelo energético sostenible).

NUESTRO SISTEMA ENERGÉTICO

Analizando nuestro sistema energético, son varias las características que podríamos destacar.

En primer lugar, la gran dependencia del exterior de nuestro sistema de abastecimiento energético. En 2009, el 77% de la energía primaria total era importada, según datos de la Secretaría de Estado de la Energía (Secretaría de Estado de la Energía, 2010). Asimismo, nuestro sistema presenta una alta intensidad energética (IE), o lo que es igual, un alto consumo energético por unidad de producto interior bruto, si lo comparamos con otros países europeos. Mientras que la intensidad energética media de los países de la Unión Europea hasta 2005 registraba una tasa descendente, en España la

tasa iba en aumento. Sin embargo, a partir de 2005, la demanda energética ha experimentado descensos superiores al PIB por lo que la intensidad energética ha bajado tanto en energía final como en primaria. Se atribuye este efecto sobre todo al descenso del consumo energético en los sectores productivos como consecuencia de la crisis económica, pero también a un aumento en la eficiencia energética y a una mejora en la transformación de energía primaria en electricidad mediante la introducción de plantas de ciclo combinado y tecnologías renovables (Secretaría de Estado de la Energía, 2010). No obstante, en el año 2008 la IE española era todavía

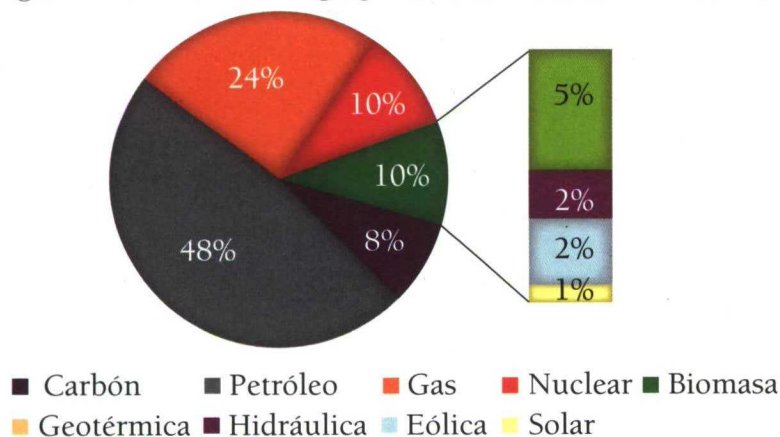
Nuestro sistema de abastecimiento energético tiene una gran dependencia del exterior. En 2009, el 77% de la energía primaria total era importada, según datos de la Secretaría de Estado de la Energía. Además, alrededor de un 80% de nuestro abastecimiento de energía primaria en 2009 era de origen fósil

un 19% superior a la de la UE-15. Esto tiene que ver con nuestra estructura económica, centrada en sectores de alto consumo energético y poco valor añadido, como el sector de la construcción, y por un alto consumo energético en el sector residencial y en el transporte privado (Mendiluce, 2010).

Nuestro sistema energético se caracteriza asimismo por una alta participación de las energías fósiles. Así, según datos de la Secretaría de Estado de la Energía (SEE, 2010) alrededor de un 80% de nuestro abastecimiento de energía primaria en 2009 era de origen fósil.

Nuestro país tiene, sin embargo, un buen potencial de energías renovables, en especial de eólica y solar. En los últimos 5 años estas tecnologías han experimentado un enorme crecimiento tanto en capacidad instalada como en generación. En 2009, según datos del barómetro europeo de las energías renovables (EurObserv'ER, 2011), España ocupó el primer lugar en producción de electricidad con energía eólica, y el segundo en capacidad acumulada por detrás de Alemania. En cuanto a energía solar, se situó en segundo lugar en capacidad acumulada en solar fotovoltaica y en primer lugar en solar termoelectrica, posi-

Figura 1. Consumo de energía primaria en el año 2009 (SEE, 2010)



Como consecuencia directa de esta estructura, nuestro sistema energético genera altas emisiones de gases de efecto invernadero. Hasta 2007, la tendencia de las emisiones de gases de efecto invernadero ha sido al alza con un crecimiento muy por encima del objetivo comprometido dentro del Protocolo de Kyoto, y se ha sobrepasado en un 51% los niveles del año base. Esto hacía difícil, si no imposible, cumplir con el compromiso. No obstante, a partir de 2008, las emisiones han ido disminuyendo hasta situarse en 2010 en 247 MtCO₂ según datos provisionales de la Secretaría de Estado de la Energía (Secretaría de Estado de la Energía, 2011). Para no sobrepasar el 15% de las emisiones del año base en el periodo 2008-2012 –nuestro objetivo en el Protocolo de Kyoto–, en los dos próximos años no se debería superar los 325 MtCO₂.

Nuestro país tiene, sin embargo, un buen potencial de energías renovables. En 2009, España ocupó el primer lugar en producción de electricidad con energía eólica y el segundo en capacidad acumulada por detrás de Alemania. En cuanto a energía solar, se situó en segundo lugar en capacidad acumulada en solar fotovoltaica y en primer lugar en solar termoelectrica

ción que mantiene con un parque en continuo crecimiento. Este posicionamiento además ha favorecido el desarrollo y crecimiento de un sector industrial con gran potencial de exportación a países dentro y fuera de la UE (San Miguel G. et al., 2010).

Es también de destacar la gran penetración en el sistema de las centrales de ciclo combinado de gas natural que en 2009 supusieron el 92% de la capacidad instalada de plantas de gas. Esta tendencia se ha visto reducida en los últimos años debido al descenso en el consumo eléctrico (Secretaría de Estado de la Energía, 2010).

Finalmente, cabe señalar la incertidumbre en el futuro de las políticas nucleares. Aunque no existe una moratoria nuclear, no hay planes a medio plazo para sustituir el parque nuclear. Esto nos llevaría a un abandono de la energía nuclear de fisión en 2028 con el cierre de la última central y sin tener en cuenta un posible alargamiento de la vida de las centrales o la instalación de nuevas plantas de generación avanzada. El trágico accidente de la central de Fukushima en marzo de este año ha contribuido además a que la sociedad se cuestione de nuevo este tipo de energía.

Tras esta breve exposición, queda patente la insostenibilidad de nuestro sistema y la necesidad de dar un giro hacia un sistema energético sostenible a través de cambios tanto en la demanda como en la oferta.

Desde el punto de vista de la demanda, es necesario introducir medidas de eficiencia y ahorro energético en todos los sectores de consumo (residencial, servicios, transporte, industria, etc). En cuanto a la oferta, hay que promover el uso de fuentes de energía renovables y de tecnologías más eficientes que disminuyan la necesidad de las importaciones de combustibles fósiles y contribuyan al alcance de los objetivos de reducción de emisiones de CO₂.

Estos cambios requieren de inversiones importantes por lo que se hace imprescindible que existan estudios de prospectiva que exploren

Es necesario dar un giro hacia un sistema energético sostenible a través de cambios tanto en la demanda como en la oferta. Desde el punto de vista de la demanda, es necesario introducir medidas de eficiencia y ahorro energético en todos los sectores de consumo. En cuanto a la oferta, hay que promover el uso de fuentes de energía renovables y de tecnologías más eficientes que disminuyan la necesidad de las importaciones de combustibles fósiles y contribuyan al alcance de los objetivos de reducción de emisiones de CO₂.

los caminos posibles para llegar al objetivo marcado. Estos estudios han de tener en cuenta la evolución de factores determinantes en la demanda futura, como es el crecimiento de la población y el crecimiento de la economía representado por el PIB. También han de considerar el sistema energético actual y su capacidad para crecer con todas las alternativas tecnológicas posibles, presentes y futuras, de manera coste eficiente, así como las obligaciones en materia medioambiental.

Los modelos energéticos de optimización son herramientas que permiten combinar todos estos parámetros en un ejercicio de modelización y que dan como solución un sistema energético óptimo a medio y largo plazo en el que se satisface la demanda energética bajo determinadas restricciones medioambientales, políticas, tecnológicas y/o económicas.

En este artículo se ha usado un modelo de estas características a fin de mostrar un posible ca-

Se hace imprescindible que existan estudios de prospectiva que exploren los caminos posibles para llegar a los objetivos marcados. Se ha optado para este ejercicio por el modelo TIMES-Spain desarrollado en CIEMAT con el generador de modelos TIMES del programa ETSAP de la Agencia Internacional de la Energía

mino para alcanzar un modelo energético más sostenible en el año 2030.

MODELO DEL SISTEMA ENERGÉTICO ESPAÑOL, TIMES-SPAIN

Un modelo energético es una representación matemática de un sistema energético. Hay muchos tipos de modelos energéticos, pero en este artículo nos ocuparemos de los modelos energéticos de optimización que sirven para la representación, optimización y análisis de sistemas energéticos. Entendemos por optimización la maximización del beneficio total (consumidor y productor) dadas las características del sistema energético (tecnologías, recursos) y satisfaciendo las demandas de servicios energéticos finales y cualquier otra restricción medioambiental (emisiones de CO₂), económica o política (Directiva 2009/28/CE).

Se ha optado para este ejercicio por el modelo TIMES-Spain desarrollado en CIEMAT (www.ciemat.es) con el generador de modelos TIMES del programa ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme) de la Agencia Internacional de la Energía (Loulou R. et al., 2005).

TIMES-Spain es un modelo tecnoeconómico del sistema energético español, fruto de la participación de la Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos de CIEMAT en dos proyectos euro-

peos, NEEDS¹ y RES2020², y forma parte del modelo PanEuropeo Times (PET) del sistema energético de la UE27, más Noruega, Islandia y Suiza, resultado de ambos proyectos.

Las principales características de este modelo son las siguientes:

- Consiste en una extensa base de datos económicos, técnicos y medioambientales de cientos de tecnologías energéticas actuales y futuras del sistema energético español.
- Se trata de un modelo *bottom-up* que analiza toda esta información en detalle para llegar a una solución única.
- Su horizonte temporal llega hasta 2050, aunque los mejores resultados son los producidos hasta 2020 o 2030 ya que las incertidumbres son menores.
- Es un modelo dinámico en cuanto que genera resultados para distintos periodos de tiempo a la vez.
- Es un modelo de equilibrio parcial. De equilibrio, porque los suministradores proporcionan exactamente la cantidad de entradas en los procesos que necesitan los consumidores, y parcial porque solo se modeliza una parte de la economía, en este caso, el sector energético.
- Considera un mercado competitivo con visión perfecta donde ningún participante puede ejercer individualmente ningún poder sobre este, y todos los participantes tiene, acceso a la información, todos conocen cuál va a ser la demanda en un tiempo futuro y cómo van a ser las tecnologías y combustibles que cubran esa demanda.
- En el modelo la demanda es elástica, depende de la variación de los precios.
- Contempla 5 sectores de demanda: agricultura, residencial, comercial, industria y transporte.

¹ New Energy Externalities Development for Sustainability, <http://www.needs-project.org>.

² Monitoring and Evaluation of the RES directives implementation in the EU27 and policy recommendations for 2020, <http://www.res2020.eu>.

- El sector suministro comprende las actividades de obtención del combustible, la producción de energía primaria, la transformación en energía final, la importación y la exportación.
- El sector de generación eléctrica incluye a los auto-productores y a la cogeneración, además de las grandes instalaciones fósiles, nucleares y renovables.
- El modelo incluye información detallada sobre los potenciales de los recursos renovables y contempla distintos factores de disponibilidad para las energías renovables en función de la estación del año.
- Incluye las emisiones de gases de efecto invernadero de todos los procesos que se dan en el sistema energético.

Entre las posibles aplicaciones del modelo están la evaluación del potencial de nuevas tecnologías para sustituir a otras en los mercados energéticos, el análisis de las consecuencias del agotamiento de los combustibles convencionales, el estudio de alternativas para mejorar la seguridad energética o para alcanzar los objetivos medioambientales, la valoración del impacto del comercio entre regiones o de los efectos que tienen los instrumentos económicos, como las tasas a las emisiones o las primas y subvenciones a determinadas tecnologías y el análisis retrospectivo (*backcasting* en inglés) para llegar a alcanzar el escenario de interés.

ESCENARIOS ENERGÉTICOS SOSTENIBLES

Teniendo en cuenta la dependencia del exterior en energía primaria, la escasez de los recursos fósiles, las incertidumbres sobre el futuro nuclear, el potencial de energías renovables y la madurez de alguna de estas tecnologías en nuestro país, se ha planteado un escenario sostenible en 2020 y 2030 como transición a un sistema energético en 2050 en el que las emisiones de CO₂ se reduzcan un 80% sobre los valores de 1990. Este escenario de reducción ha sido ya analizado

por distintas organizaciones en un marco global (WWF/Ecofys/OMA, 2011), europeo (European Climate Foundation, 2010; Greenpeace/EREC, 2010) y nacional (Fundación Ideas, 2009; Fundación CONAMA/ CCEIM, 2011), y supondría una reducción de la concentración de CO₂ hasta los 450 ppm con la consiguiente limitación del incremento de la temperatura global en 2 °C.

En este artículo se mostrarán los resultados de un análisis retrospectivo donde partiendo de una situación futura a la que se quiere llegar retrocedemos para identificar las medidas y soluciones intermedias necesarias para alcanzarla. Para comparar los resultados, además de plantear el escenario sostenible, se plantea un escenario base que incorpora todas las políticas energéticas y medioambientales en vigor.

Para construir ambos escenarios, es fundamental conocer la evolución de la demanda en los distintos sectores a lo largo de todo el periodo de estudio para establecer el sistema energético que la satisfaga. Para ello, se calcula la proyección de la demanda atendiendo a la evolución de dos parámetros socioeconómicos fundamentales: el producto interior bruto (PIB) y la población. La evolución del PIB es el resultado de la ejecución de un modelo macroeconómico, el GEM-E3³, realizada en el marco del proyecto RES2020. Esta evolución no ha podido ser ajustada al escenario de recesión económica que vivimos actualmente, por lo que el ritmo de la demanda de energía en valores absolutos estará sobreestimada, lo cual ha de ser tenido en cuenta a la hora de interpretar los resultados. En cuanto a la evolución de la población, se ha considerado la previsión del Instituto Nacional de Estadística⁴ (INE).

Las hipótesis consideradas en cada escenario en particular se definen a continuación:

Escenario base: como se ha dicho, este escenario contempla las políticas existentes, como los objetivos de penetración de energías reno-

³ <http://www.gem-e3.net>.

⁴ <http://www.ine.es>.

vables marcados por la Directiva 2009/28/EC, donde un 20% del consumo energético final y un 10% del consumo final de energía en el transporte en 2020 han de ser con fuentes renovables, y las emisiones de CO₂ en 2020 serán un 20% inferiores a las emisiones de 1990. Para ello se ha tenido en cuenta, por un parte, la existencia del mercado de emisiones de CO₂ para los sectores que participan en el mismo mediante la aplicación de una tasa de 20 euros₂₀₀₅/tCO₂ para 2020, y de 24 euros₂₀₀₅/tCO₂, a partir de 2030 y hasta 2050. Y para los sectores que no entran en este mercado, se han limitado las emisiones de acuerdo a las indicaciones de la Directiva sobre el reparto del esfuerzo de reducción, en nuestro caso un 10% sobre las emisiones de 2005 en el año 2020. Además se ha limitado el CO₂ total en 2020 procedente de todos los sectores al 80% de las emisiones de 1990. Estos mismos límites se han mantenido en todo el horizonte de modelización hasta 2050.

En cuanto a las mejoras en la eficiencia energética, se ha considerado que mejorará en un 22% en el sector residencial y de servicios respecto del año 2000, en base a mejoras de la envolvente térmica y optimización del diseño de los edificios para reducir al máximo las demandas energéticas. En cuanto al sector transporte, se ha supuesto una mejora del 10% respecto de la existente en 2000, mediante diferentes medidas tendentes a mejorar los patrones de conducción y a reducir los transportes innecesarios.

También, de acuerdo a los planes en preparación del Gobierno para la introducción del coche eléctrico, se ha supuesto que en 2020 el parque de automóviles contará con un millón de estos vehículos.

Por último, en lo que a energía nuclear se refiere, se ha considerado que no se instalarán nuevas plantas, y las plantas actuales se cerrarán al final de su vida útil.

Todas estas hipótesis se mantienen constantes hasta el final del periodo de modelización, 2050.

Escenario sostenible: este escenario parte de las hipótesis del escenario base y va más allá en cuanto a medidas que actúan sobre los sectores de demanda y oferta. Entre las primeras contempla que, dentro del sector de la edificación, cada año hasta 2050 se rehabilitarán 500.000 viviendas con el fin de conseguir un ahorro energético del 50% y que todas las nuevas viviendas tienen una demanda energética un 80% inferior a la actual. Esto supone un ahorro del 46% en 2050. En el transporte se ha considerado un aumento de la eficiencia en 2020 de un 22% respecto de la existente en el año 2000, y un parque de vehículos eléctricos de pasajeros de 2,5 millones en 2020, 5 millones en 2030 y 15 millones en 2050. Se ha considerado asimismo que el transporte de mercancías experimenta un cambio modal radical hacia el transporte ferroviario. De esta forma, en 2020, un 10% de la demanda de transporte total de mercancías por carretera pasa a transporte en tren, en 2030 un 30% y, en 2050, un 70%.

En cuanto a las medidas de oferta, se considera una penetración elevada de tecnologías renovables, basada en el elevado potencial disponible y la previsible reducción de costes de las mismas en contraposición a la subida previsible del coste de los combustibles fósiles. Los potenciales han sido tomados de la literatura (Greenpeace/EREC, 2007; Toom, 2007; Resch et al, 2006; Fischer, G., Hiznyik, E., Prieler, S., van Velthuisen, H., 2007; EUROELECTRIC, 2006. RES2020 Deliverable D2.2 y D2.3). Más información se puede encontrar en el Informe Cambio Global España 2020/50. Energía, economía y sociedad (Fundación CONAMA/CCE-IM, 2011).

En ambos escenarios se ha incluido el sistema de primas a las tecnologías eléctricas del Régimen Especial, actualizadas al año 2009, y las distintas ayudas a la inversión disponibles para otras tecnologías renovables. En cuanto a los precios de los combustibles fósiles, el precio del barril de petróleo considerado ha sido el estimado por el WEO 2008 (OECD/IEA, 2008) en alrededor de 100 \$ por barril en 2010.

RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para los escenarios sostenibles en 2020 y 2030 con el modelo energético TIMES-Spain.

• Consumo de energía primaria

La evolución del escenario base muestra una tendencia creciente de consumo de energía primaria que en 2030 es un 15% superior al consumo del año 2009. En 2020 la estructura de consumo de energía primaria es similar a la existente en el año 2009 con una mayor contribución del carbón y de las energías renovables. En 2030, la energía nuclear desaparece y aumenta el consumo de carbón, petróleo y también de energías renovables.

En el escenario sostenible, llama la atención el hecho de que el consumo de energía primaria en el año 2030 se ve reducido en un 25% respecto al año 2009, debido sobre todo a las reducciones en los sectores residencial, servicios y transporte.

La contribución de las energías renovables alcanza el 35%, mientras que la energía nuclear desaparece del escenario energético en 2030.

El consumo de energía primaria fósil también disminuye sensiblemente entre 2009 y el escenario sostenible en 2030, más en el caso del

carbón y el petróleo que en el gas. Su consumo se mantiene sobre todo en el sector industria.

• Consumo de energía final

En cuanto a la evolución del consumo energía final, el escenario base muestra una tendencia creciente y alcanzar en 2030 un consumo de energía final un 19% superior al correspondiente consumo en el año 2009. La estructura de este consumo es similar a la actual con mayor contribución de las energías renovables y menor participación del petróleo.

En el escenario sostenible, el consumo de energía final en el año 2030 se reduce en un 12% con respecto a 2009. Las medidas de eficiencia adoptadas en los distintos sectores y el uso de tecnologías más eficientes permiten ahorrar un 26% del consumo energético final total en 2030 respecto al escenario base ese mismo año. En cuanto a la electricidad, su participación en el consumo de energía final aumenta desde el 21% en 2009 hasta un 27% en el escenario sostenible 2030.

La diferencia en la evolución del consumo de la energía primaria y final se debe a una mayor eficiencia del sistema energético en el escenario sostenible.

La biomasa en 2030 aumenta su participación en la energía final tanto en el escenario base

Figura 2. Consumo de energía primaria en los escenarios base y sostenible

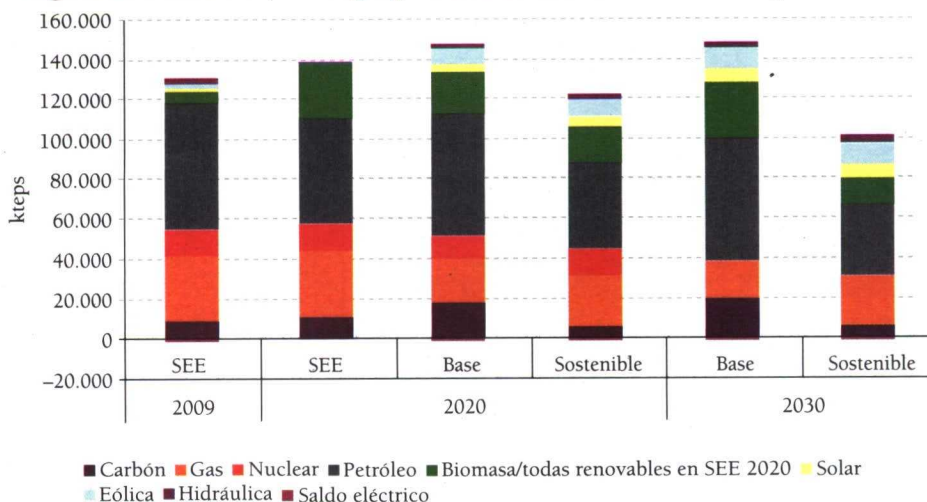
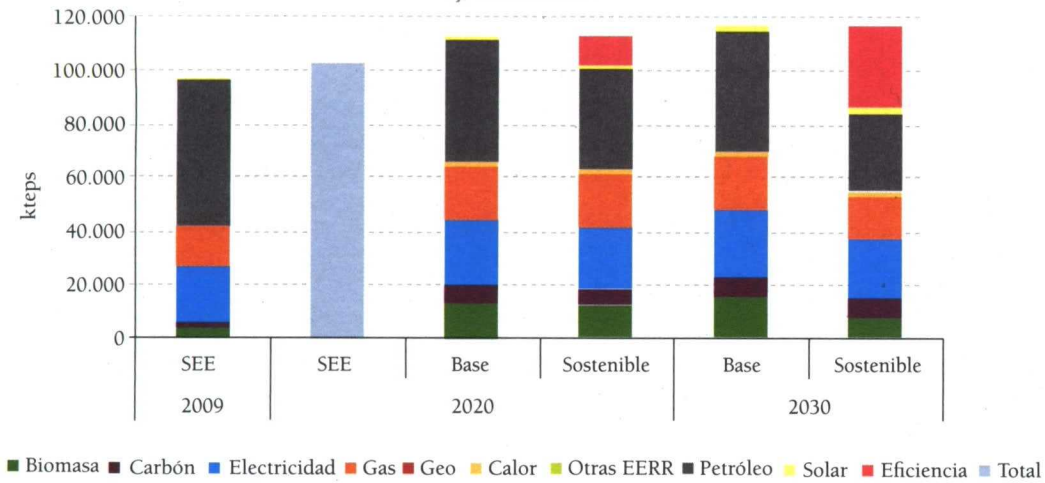


Figura 3. Consumo de energía final por combustible en los escenarios base y sostenible



como en el sostenible. El carbón mantiene una cuota de participación en el consumo de energía final debido a su uso en el sector industrial, así como el gas, que incrementa ligeramente su tasa de penetración. El consumo de petróleo se reduce desde un 57% del total en 2009 hasta un 34% en 2030 en el escenario sostenible y mucho más en términos absolutos.

Por sectores, el transporte pasa de contribuir en un 39% al consumo final de energía en 2009 a un 18% en el escenario sostenible 2030. Los sectores residencial, servicios y agrícola reducen su contribución al consumo final pasando del 28% en 2009 al 24%. El único sector que

aumenta su participación en el consumo final de energía entre 2009 y el escenario sostenible 2030 es la industria (Figura 4) que pasa de un 33% a un 58%. Comparando los dos escenarios de 2030 se observa que en el base la participación del sector industria es todavía mayor siendo la diferencia de 10 500 ksteps lo que supone un ahorro del 18% en el consumo de este sector entre el escenario base y el sostenible.

En cuanto al consumo final de combustibles por sector, ambos escenarios muestran un incremento del consumo de energía final en el sector industrial aunque bastante mayor en el caso del escenario base. En el escenario sostenible 2030, el

Figura 4. Consumo de energía final por sectores en los escenarios base y sostenible

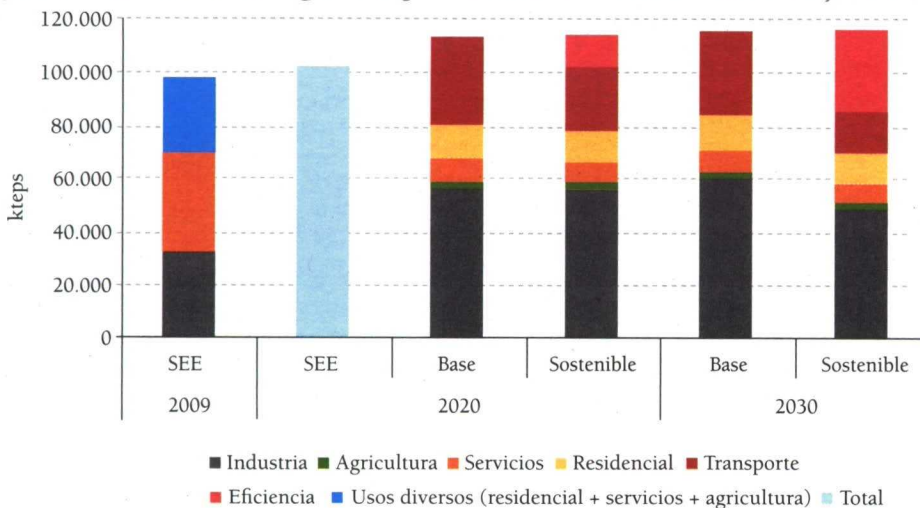
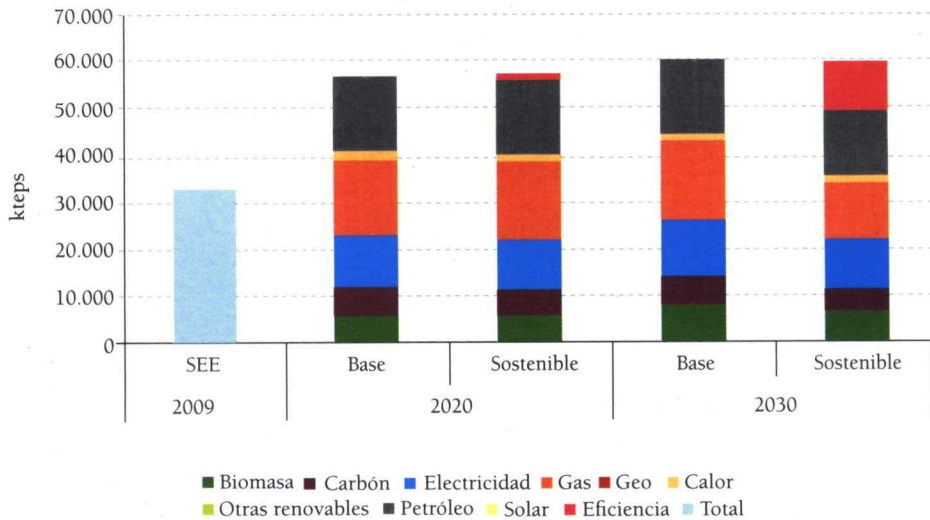


Figura 5. Consumo de energía final en el sector industria en los escenarios base y sostenible



58% del consumo en la industria es de combustibles fósiles, mientras que la electricidad supone el 27%, y la biomasa, el 11%. El carbón se consume fundamentalmente en la siderurgia e industria del cemento ya con tecnologías más eficientes y provistas de sistemas de captura de CO₂.

En el transporte, en ambos escenarios se observa una reducción de consumo final en 2030 que, en el caso del escenario sostenible es muy importante suponiendo un 59% menos que en 2009. La razón de esta reducción está en la introducción de vehículos eléctricos y más eficien-

tes, además de un cambio en el patrón de uso y conducción y un cambio modal en el transporte de mercancías. El uso de los vehículos eléctricos y el aumento del uso de los trenes también eléctricos hacen que se incremente el consumo de electricidad y su participación en el consumo total. A su vez, el consumo de petróleo se reduce a la mitad con respecto al año base.

En 2030 en el escenario sostenible, el consumo de energías renovables en el transporte alcanza el 26%, de los cuales el 15% se debe al consumo de biocarburantes.

Figura 6. Consumo de energía final en el sector transporte en los escenarios base y sostenible

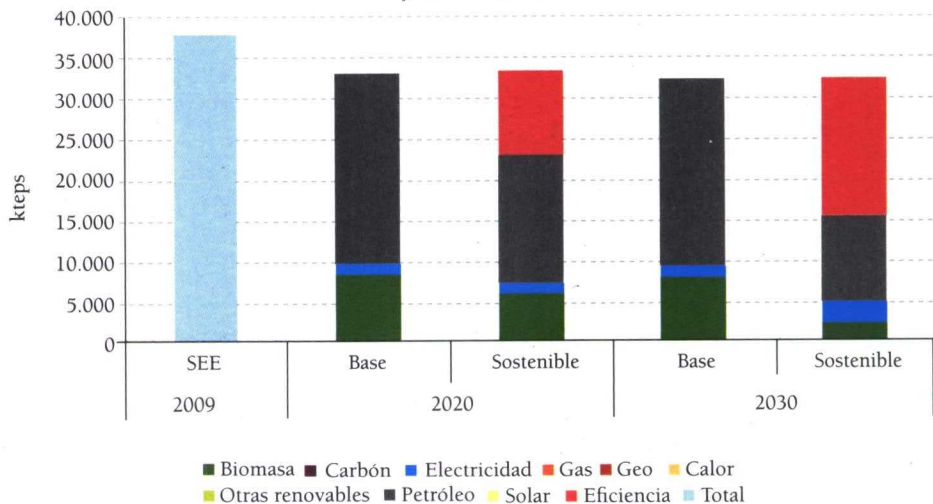
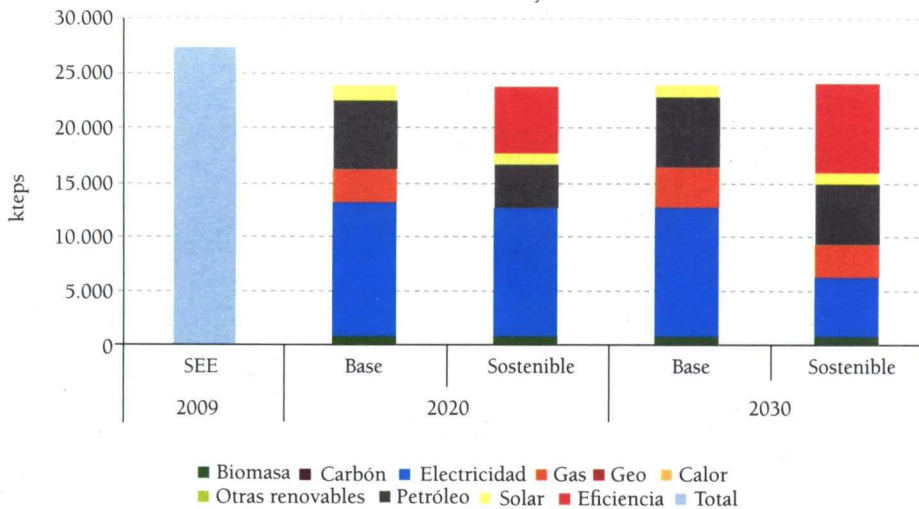


Figura 7. Consumo de energía final en los sectores residencial, servicios y agrícola en los escenarios base y sostenible



Por último, en los sectores residencial, de servicios y agrícola, igual que en el transporte, también se reduce el consumo de energía final en el año 2030 respecto del año 2009, en ambos escenarios, especialmente en el caso del escenario sostenible. Esta reducción se debe a la introducción de tecnologías más eficientes junto con la mejora de la envolvente térmica de los edificios existentes y la optimización del diseño de las nuevas construcciones, todo ello para disminuir la demanda energética.

Tanto el gas como el petróleo juegan todavía un papel importante en 2030 en estos sectores y

suponen cerca del 32% del consumo final en el escenario sostenible. Esta elevada participación se debe a la gran disminución del consumo total. El consumo de energías renovables, incluyendo la electricidad que en 2030 es 100% renovable, supone el 45% del total.

• Dependencia energética

Como consecuencia inmediata de la reducción de la demanda gracias a las medidas de ahorro y del aumento de la participación de las energías renovables en el sistema, la dependencia energética va a disminuir en el medio y largo plazo.

Figura 8. Importación de energía y grado de autoabastecimiento en los escenarios base y sostenible

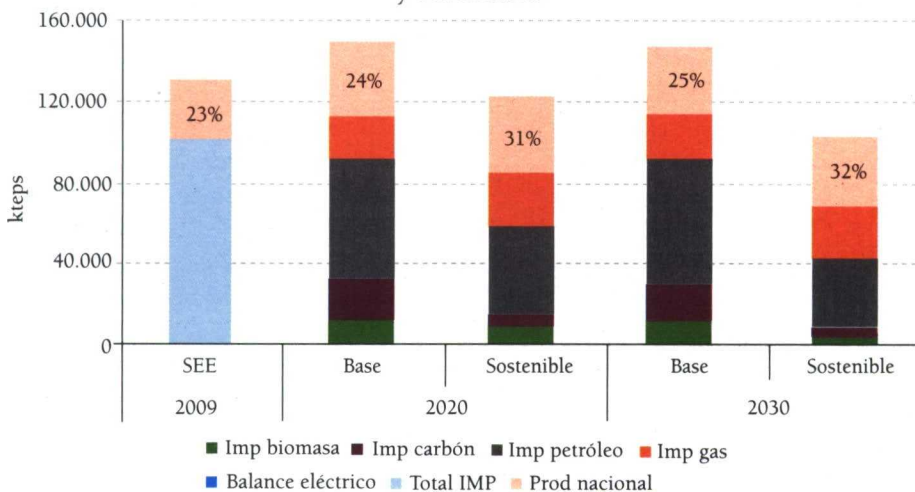
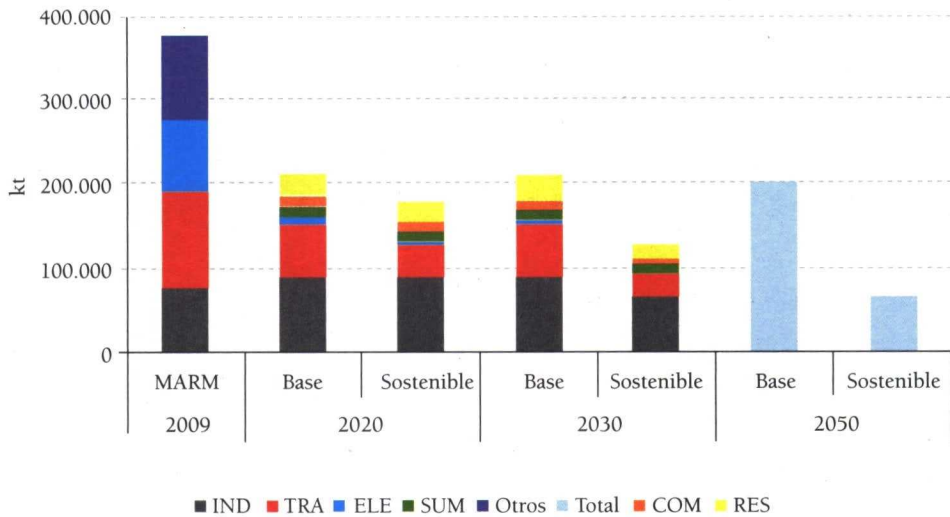


Figura 9. Emisiones de CO₂ en los escenarios base y sostenible



Todos los escenarios futuros muestran un mayor grado de autoabastecimiento, especialmente en el caso del escenario sostenible. El nivel de autoabastecimiento pasa de un 22% en 2009 (era del 17% en 2008) a un 32% en el escenario sostenible de 2030. Como además se ha visto anteriormente, el consumo de energía primaria también se reduce en un 22%, por lo que contribuye a que la importación de esta energía descienda de un modo considerable y supone en el escenario sostenible de 2030 un 32% menos a 2009 al ahorrarse importaciones de 32.572 ktep. En comparación con el escenario base, se reducen fundamentalmente las importaciones de petróleo y carbón, pero también de biomasa.

• **Emisiones de CO₂**

El objetivo de este estudio era plantear un escenario ambicioso de reducción del 80% de las emisiones de CO₂ en 2050 con unos objetivos intermedios en los años de transición 2020 y 2030 en los que el descenso será del 30% y 50% respectivamente. Igual que en el caso de la dependencia energética, las reducciones son consecuencia de la disminución de la demanda y de la incorporación masiva de tecnologías bajas en emisión, de ahí la diferencia entre las emisiones en el escenario base y el escenario sostenible, mucho mayor en 2030 y 2050.

En la Figura 9 se representan las emisiones de CO₂ por sector. Las mayores reducciones corresponden al sector de generación de electricidad, que en los escenarios sostenibles 2020 y 2030 supone un 2% y 0% respectivamente, ya que en este año la generación de electricidad es 100% renovable. En el escenario sostenible de 2030, la mayor contribución a las emisiones totales de CO₂ corresponde al sector industrial debido a un mayor uso de combustibles fósiles. En este sector se hace necesaria la incorporación de técnicas de captura y secuestro de CO₂ en las actividades industriales para reducir aún más las emisiones.

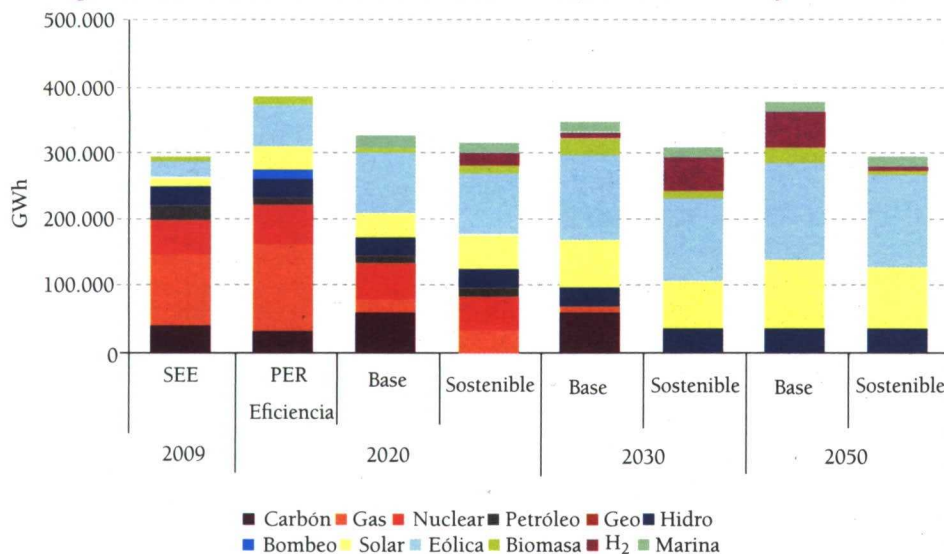
• **Sector eléctrico**

Las restricciones a las emisiones de CO₂ en 2020 y 2030 hacen que aumente considerablemente la participación de las energías renovables en el sistema, que alcanzan en 2020 un 70% de la electricidad generada y en 2030 el 100%.

En la Figura 11 se puede comparar los resultados del modelo para 2020 con la proyección del Plan de Energías Renovables de España (PER) 2011- 2020⁵. En el escenario sostenible 2020, la penetración de las renovables es un 30% mayor que la prevista por el nuevo PER.

⁵ IDAE, 2011.

Figura 10. Producción de electricidad en los escenarios base y sostenible



La introducción masiva de las renovables desplaza el uso de los combustibles fósiles, por lo que desaparece el carbón en los escenarios sostenibles 2020 y 2030, y el gas en el escenario sostenible 2030. También en el escenario sostenible 2030 desaparece la energía nuclear como consecuencia de la finalización de la vida útil de las plantas actuales, de manera que este escenario pasa entonces a ser 100% renovable.

Entre las renovables, la tecnología con mayor participación en todos los escenarios es la eólica, que supone un 30% en 2020 y un 41% en 2030 en el escenario sostenible de 2030, seguida de la solar con un 16% en 2020 y un 22% en 2030 en el mismo escenario. La bioelectricidad alcanza una penetración del 4% en 2020 y 2030, y aparecen las tecnologías marinas (de marea y de olas) también con un 4% en 2020 y 2030.

En 2020 en el escenario sostenible y en 2030 en todos los escenarios, se incorpora al sistema la tecnología de pilas de combustible estacionarias, que en el escenario sostenible de 2030 supone un 17% de la producción eléctrica total. Este hidrógeno es de origen renovable ya que procede de la gasificación de biomasa.

COSTES DEL SISTEMA

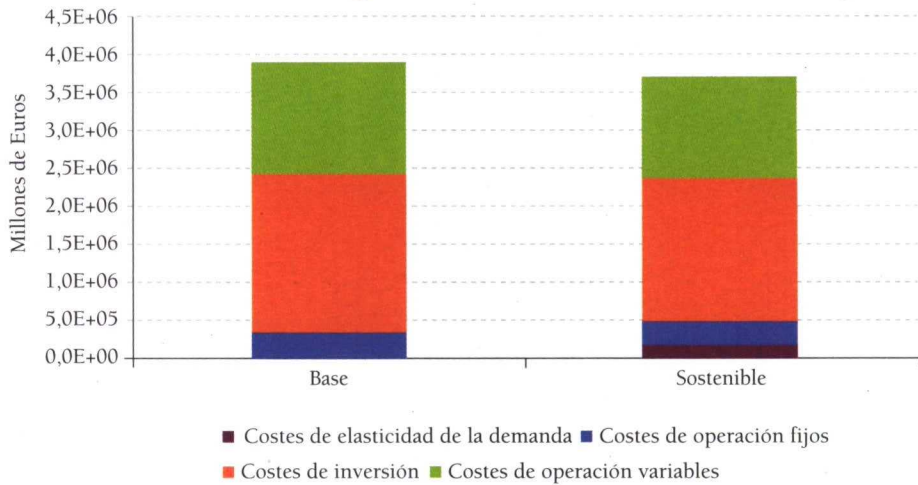
Hasta ahora se ha tratado cómo es posible alcanzar escenarios energéticos futuros con menos emisiones de CO₂ y menos dependencia energética del exterior. Se ha visto qué tecnologías entrarían a formar parte de estos sistemas y con qué participación. La siguiente cuestión que se plantea es el coste que esto supone y si es viable.

Partiendo de unos costes de tecnologías y acciones conservadores y de fuentes objetivas como la Agencia Internacional de la Energía, los resultados obtenidos muestran que los costes totales del escenario sostenible se reducen con respecto al escenario base debido sobre todo al ahorro en el consumo energético. (Figura 11).

Un factor importante en la reducción del coste total es el descenso de los gastos de operación variables, 11% más bajos en el escenario sostenible debido a la reducción del consumo de combustibles fósiles. Otros costes, como los de inversión y de operación fijos, también se ven aminorados, ambos en un 6%, respecto del escenario base.

Los costes de inversión de las nuevas tecnologías se van reduciendo según se van incorporando en el sistema y haciendo maduras y van mejorando las economías de escala.

Figura 11. Costes del sistema energético hasta 2030 en los escenarios base y sostenible



Se ha visto cómo la reducción de la demanda es determinante en la disminución de costes, pero estas medidas de reducción también tienen a su vez un gasto que hay que tener en cuenta. Algunas medidas tienen asociados costes de adaptación, transición o pérdida de bienestar (Linares, P. y X. Labandeira, 2010). Estos son los que se muestran en la figura como costes de la elasticidad de la demanda. Las medidas que se han considerado en este trabajo (véase definición del escenario sostenible y para más información el Informe Cambio Global España 2020/50. Energía, economía y sociedad de la Fundación CONAMA y el CCEIM) tienen un coste social reducido al combinar el gasto tecnológico con el cambio de hábitos a través de información a la población, concienciación y mejora de la planificación.

Es necesario tener en cuenta que los costes de implantación de algunas de las distintas medidas de eficiencia planteadas en los sectores de demanda (mejora de la envuelta térmica de los edificios, precio de las infraestructuras necesarias para el cambio modal en el sector de transporte hacia el transporte por tren) no se han contabilizado.

Con respecto al sector eléctrico, el aumento en el uso de la electricidad en el sistema energético y la mayor participación de las energías renovables hacen que los costes de generación eléctrica suban tanto en el escenario base como en el sostenible hasta el año 2020. Después, esta tendencia se invierte en el escenario sostenible. Es interesante destacar la diferencia entre los costes del sistema eléctrico sin la adopción de

Figura 12. Coste total de la producción de electricidad en los escenarios base y sostenible

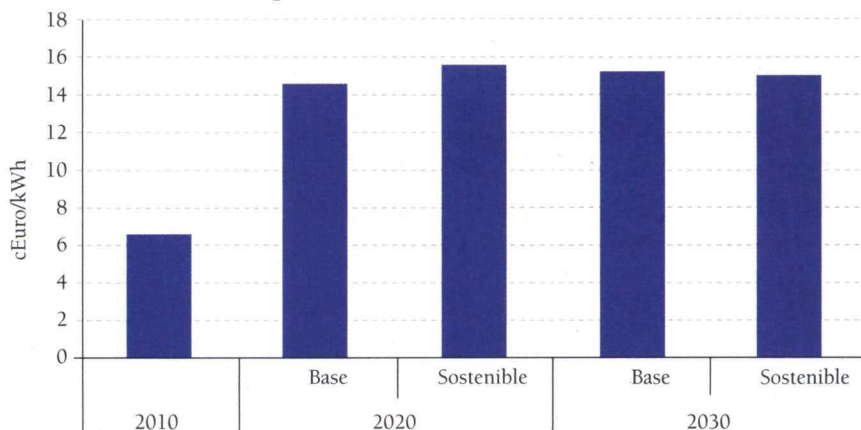
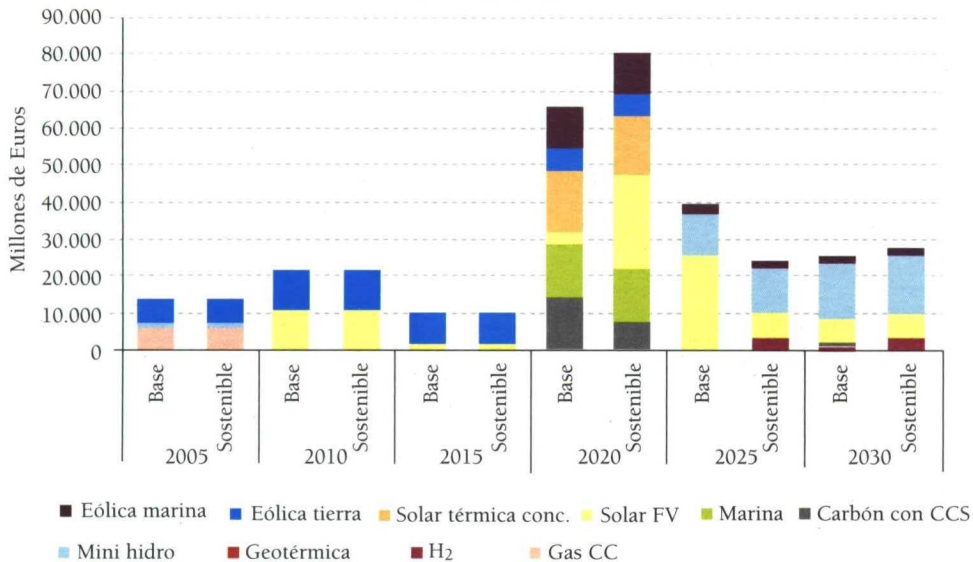


Figura 13. Coste de las nuevas inversiones en el sector eléctrico en los escenarios base y sostenible



medidas de eficiencia ni de reducción de emisiones y los del sistema sostenible, pues ya en 2030 estos últimos son inferiores.

Si atendemos solo al aumento de los costes de la producción de electricidad desde el año de referencia hasta 2030, estos son el doble debido al gran aumento de la demanda total de electricidad (lo que implica que el precio por MWh no es tan alto) y debido también a los costes de electricidad en nuestro país, que son artificialmente bajos e inferiores, en general, a los del resto de Europa, por lo que existe todavía un importante recorrido para la equiparación de estos costes con los países de nuestro entorno.

Conviene recordar que mientras los gastos de inversión de las tecnologías renovables se van abaratando con su incorporación al mercado y el recurso es libre e inagotable, los costes de los combustibles fósiles van en aumento y hacia su agotamiento.

Respecto a los costes de inversión de las nuevas tecnologías del sector eléctrico, la Figura 13 muestra la inversión total necesaria en nuevas capacidades. Durante los primeros periodos, en ambos escenarios es necesario realizar inversiones en energía eólica y solar fotovoltaica. Las mayores inversiones se producen alrededor del

año 2020 en los dos escenarios, momento en el que muchas de las plantas actuales agotan su vida útil. En este momento, ambos muestran la necesidad de invertir en nuevas tecnologías renovables y fósiles con captura de CO₂. Así, se producen importantes inversiones en solar fotovoltaica y térmica, eólica terrestre y también marina, así como en tecnologías marinas y centrales de carbón con captura de CO₂.

En los periodos siguientes se sigue invirtiendo en solar fotovoltaica y eólica terrestre. A partir de 2025 en el escenario sostenible y de 2030 en el escenario base, es necesario empezar a invertir en tecnologías de pilas de combustible de hidrógeno.

CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo hemos tratado de mostrar cómo puede evolucionar el sistema energético español con las políticas y medidas actuales en lo que hemos llamado escenario base, así como un camino posible para alcanzar un sistema energético más sostenible en el futuro.

Hemos visto cómo las medidas planteadas logran promover la incorporación de energías renovables al sistema y reducir las emisiones de gases de

El escenario sostenible planteado en el modelo, siendo mucho más exigente en cuanto a reducción de emisiones y de medidas de eficiencia energética, nos muestra cómo es posible alcanzar escenarios energéticos futuros con muchas menos emisiones de CO₂ y menos dependencia energética del exterior con un coste total menor que el del escenario base

efecto invernadero, aunque no logran que decaigan los consumos energéticos ni disminuir sensiblemente la dependencia energética.

El escenario sostenible planteado, siendo mucho más exigente en cuanto a reducción de emisiones y de medidas de eficiencia energética, nos muestra cómo es posible alcanzar escenarios energéticos futuros con muchas menos emisiones de CO₂ y menos dependencia energética del exterior con un coste total menor que el del escenario base.

Alcanzar un modelo energético más sostenible es posible y viable. ❀

REFERENCIAS

- EurObserv'ER, 2011. 10th report on "The State of Renewable Energies in Europe".
- EURELECTRIC, 2006. *Statistics and Prospects for the European Electricity Sector*. (EURPROG 2006). 34th edition. Union of the Electricity Industry, 283p.
- European Climate Foundation, 2010. *Roadmap 2050. A Practical Guide to a prosperous, Low-Carbon Europe*. Technical Analysis.
- Fischer, G., Hizsnyik, E., Prieler, S., van Velthuisen, H., 2007. Assessment of biomass potentials for bio-fuel feedstock production in Europe: methodology and results. WorkPackage2—Biomass Potentials for Bio-fuels: Sources, Magnitudes, Land Use Impacts. REFUEL Project. International Institute for Applied Systems Analysis, 81p.
- Fundación CONAMA/CCEIM, 2011. *Cambio Global España 2020/50. Energía, economía y sociedad*.
- Fundación Ideas, 2009. *Un nuevo modelo energético para España. Recomendaciones para un futuro sostenible*.
- Greenpeace International and EREC, 2007. *Energy[r] evolution, a Sustainable World Energy Outlook*. Greenpeace International, European Renewable Energy Council, 212p.
- Greenpeace/EREC, 2010. *Energy [r]evolution. Towards a fully Renewable Energy Supply in the EU 27*.
- IDAE, 2011. *Plan de Acción Nacional de las Energías Renovables 2011-2020*.
- Linares, P. y X. Labandeira, 2010. "Energy efficiency: Economics and policy", *Journal of Economic Surveys*. vol. 24, no. 3, pp. 573-592, Julio 2010.
- Loulou R. et al., 2005. *Documentation for the TIMES Model*. Part I. ETSAP.
- Mendiluce, M., 2010. *Análisis de la evolución de la intensidad energética en España*. Economics for Energy ed.
- OECD/IEA, 2008. *World Energy Outlook 2008*.
- RES2020 Monitoring and Evaluation of the RES directives implementation in EU27 and policy recommendations for 2020. Reference Document on Renewable Energy Sources Policy and Potential Deliverables D.2.2 and D.2.3. Project no: EIE/06/170/SI2.442662 Disponible en www.res2020.eu/files/fs_inferior01_h_files/pdf/deliver/RES2020-D22-D23_Reference_Document_on_Renewable_Energy_Sources_Policy_and_Potential.pdf
- Resch, G., Faber, T., Haas, R., Ragwitz, M., Held, A., Konstantinaviciute, I., 2006. Potential and cost for renewable electricity in Europe. Report (D4) of the IEE Project OPTRES: Assessment and Optimisation of Renewable Support Schemes in the European Electricity Market. Vienna University of Technology, Institute of Power Systems and Energy Economics, Energy Economics Group, 75p.
- San Miguel G. et al., 2010. "An update of Spanish renewable energy policy and achievements in a low carbon context". *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2, 031007.
- Secretaría de Estado de la Energía, 2010. *La energía en España 2009*.
- Secretaría de Estado de la Energía, 2011. *Balance energético 2010*. Presentación de F. Maciá. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, 28 de marzo de 2011.
- Toorn, G., 2007. EU Tradewind, WP2-Wind Power Capacity Data collection. Garrad Hassan and Partners Ltd., EIE/06/022/SI2.442659, 38.
- WWF/Ecofys/OMA, 2011. *The Energy Report. 100% renewable energy by 2050*.