

Álvaro López-Peña*
Pedro Linares*
Ignacio Pérez-Arriaga*

ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE LA EFICIENCIA DE LA PROMOCIÓN DE LAS RENOVABLES Y DEL AHORRO ENERGÉTICO PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO₂ EN ESPAÑA

La promoción de las energías renovables en España ha contribuido, entre otras cosas, a una importante reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector eléctrico. Sin embargo, las políticas de eficiencia energética no han sido tan exitosas. Cabe preguntarse si no hubiera sido más rentable económicamente para el sistema energético, sin abandonar las renovables, priorizar el apoyo al ahorro. Este artículo analiza esta cuestión utilizando un modelo de optimización del sistema energético español. Los resultados muestran cómo efectivamente el apoyo al ahorro energético debería ser prioritario por su menor coste.

Palabras clave: emisiones de CO₂, promoción de renovables, ahorro energético.

Clasificación JEL: C61, H2, Q43, Q48, Q54, Q58.

1. Introducción

Como es bien sabido, las emisiones españolas de gases de efecto invernadero (GEI), a pesar de la reducción reciente, principalmente asociada a la crisis económica y

al parón de la construcción, siguen estando por encima del límite acordado en la Unión Europea en el reparto de las obligaciones derivadas del Protocolo de Kyoto. En 2008, antes de que la crisis se revelara con más fuerza, las emisiones de gases de efecto invernadero se situaban un 50 por 100 por encima de las emisiones de 1990, cuando nuestro límite era del 15 por 100 sobre dicha referencia. Esto se debe principalmente al aumento del consumo de energía, principal sector responsable en España de las emisiones de GEI. Pero esto no significa que todos los sectores hayan contribuido de la misma forma a esta evolución. El sector eléctrico, gracias a la intro-

* Cátedra BP de Energía y Sostenibilidad e Instituto de Investigación Tecnológica (IIT). Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

Los autores agradecen la financiación de BP España. Pedro Linares también agradece la financiación de los proyectos del Ministerio de Ciencia e Innovación (ECO2009-14586-C2-01) y Xunta de Galicia (INCITE08PXIB300207PR).

ducción a gran escala de los ciclos combinados de gas y a la gran penetración de las energías renovables, en especial de la energía eólica, ha sido capaz de mantener o reducir sus emisiones a pesar del elevado crecimiento de la demanda experimentado en los últimos años.

De hecho, se puede argumentar que la política pública más intensa en términos de reducción de emisiones de CO₂ en España (además del sistema de comercio de emisiones europeo) ha sido el apoyo a las energías renovables en el sector eléctrico, que ha llevado a nuestro país a constituirse como uno de los líderes mundiales en potencia instalada de energía eólica. Este apoyo a las energías renovables, incluso anterior a los acuerdos internacionales sobre cambio climático, tiene varias explicaciones: las energías renovables, además de contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, también permiten disminuir la dependencia energética, reducir las emisiones de otros contaminantes y constituyen una alternativa muy interesante en términos de creación de empleo y desarrollo tecnológico.

Sin embargo, estas ventajas de las energías renovables no deben hacernos olvidar que, al menos en lo que se refiere a la reducción de emisiones de CO₂, existen otras alternativas que pueden ser más baratas, en particular la reducción de la demanda de energía, o dicho de otra forma, el apoyo al ahorro y la eficiencia energética. Esto es aún más evidente en España por su alta intensidad energética.

Efectivamente, España hace un uso poco eficiente de la energía: la cantidad de energía que se consume por cada unidad de producto interior bruto (PIB) producida es mayor que en el caso de nuestros principales socios europeos [Mendiluce *et al.*, 2010]. Esta mayor intensidad energética deriva, en gran medida, del modelo de desarrollo económico que ha tenido lugar en España en los años previos a la presente crisis, el cual se ha basado mucho en sectores de bajo valor añadido y alto consumo energético asociado, como la construcción y el turismo de bajo coste. Se ha construido una ingente cantidad de viviendas con unos muy bajos estándares de eficiencia energética, y se ha instaurado un modelo urbanístico muy disperso y un estilo de vida intensivo en transporte

por carretera. Por tanto, el potencial de ahorro energético en España es sustancial, y también significativo el potencial de reducción de emisiones de CO₂ asociado a la reducción de la demanda de energía.

Cabe preguntarse, pues, si no hubiera sido más conveniente, estrictamente desde el punto de vista del coste incurrido y haciendo abstracción del hecho de que las energías renovables tienen objetivos impuestos por la Unión Europea, priorizar las políticas de apoyo al ahorro y la eficiencia energética en lo que se refiere a la reducción de emisiones de CO₂ en España.

Por supuesto, el desarrollo de renovables ha supuesto una importante y positiva apuesta industrial y de largo plazo, pero también es posible preguntarse si hubiera sido deseable, a día de hoy, tener una industria puntera en soluciones de eficiencia energética en vez de, o además de, la pujante industria renovable eólica o solar térmica. El objetivo del artículo es responder parcialmente a esta pregunta, comparando retrospectivamente el coste del apoyo a las energías renovables con el coste que hubiera supuesto reducir la demanda final de energía en España. Para ello se hace uso de un modelo de evaluación de políticas energéticas desarrollado por los autores de este artículo, que aplicado al caso español permite cuantificar y confirmar lo que ya ha sido en general afirmado en la literatura académica: que la forma más rentable hoy en día (desde el punto de vista de coste) de reducir emisiones de CO₂ es la potenciación de la eficiencia y el ahorro en el consumo de energía (Enkvist *et al.*, 2007). Por supuesto, este análisis está limitado ya que no considera otros indudables beneficios sociales que trae la promoción de renovables, como por ejemplo el desarrollo industrial, muy importante en el caso español, o una estrategia de más largo plazo que el horizonte temporal aquí planteado. Aunque, por otra parte, tampoco considera los beneficios asociados al desarrollo de una industria basada en la eficiencia energética. En todo caso, consideramos que aporta nuevos datos de interés para el diseño de políticas de lucha contra el cambio climático en el área energética.

En el siguiente apartado se introduce el modelo, sus principales características e hipótesis y los principales da-

tos de entrada. Después se describen los escenarios considerados y se presentan los resultados obtenidos, para lo que se hace uso de la novedosa representación de los distintos escenarios en diagramas de Sankey del sector energético español. Por último, se obtienen las conclusiones, que dan respuesta a las preguntas planteadas.

2. Metodología: el modelo y los datos

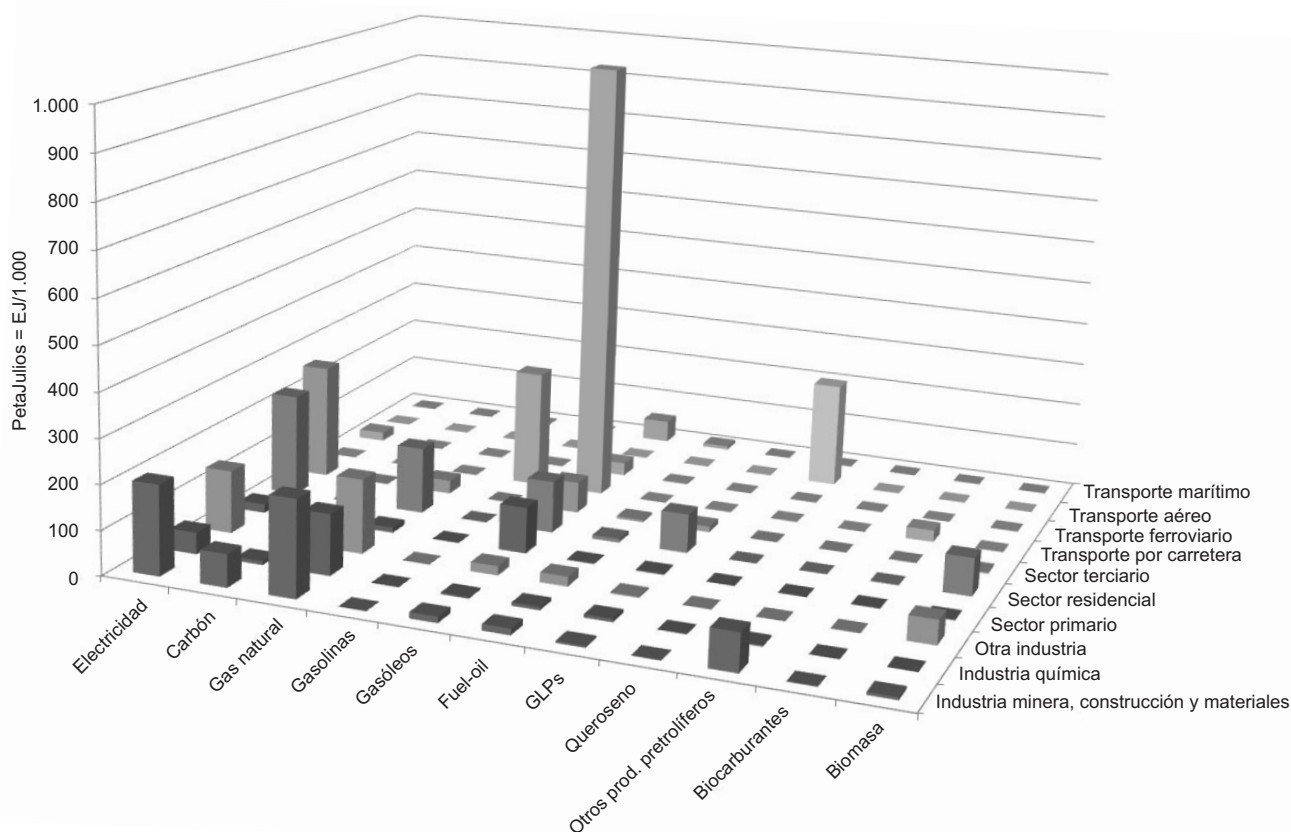
En este artículo se plantea un estudio retrospectivo, en el que se intenta determinar si un mayor énfasis en el ahorro energético podría haber sido más económico para reducir las emisiones de CO₂ producidas en España por el uso de la energía. Dado que se estudian las emisiones de todo el sector energético, el estudio debe abarcar a dicho sector entero, y no basta con solo mirar a un subsector como el eléctrico o el transporte. Para ello se ha utilizado un modelo matemático de programación lineal que calcula el suministro energético óptimo de un país en un año. Dicho modelo busca el abastecimiento energético de mínimo coste para la sociedad, dada una demanda de cada tipo de energía final en cada sector que se establece exógenamente. En dicho coste se consideran todos los costes privados (no externalidades) que influyen en el sector energético, como: inversiones, compra autóctona de energía, importaciones y exportaciones, costes fijos y variables de operación, etcétera. Es por tanto un modelo estático de equilibrio parcial. Algunos de los principales resultados del modelo son las inversiones necesarias, los costes y los flujos de energía a lo largo del sistema energético. Para una descripción detallada del modelo usado (véase López-Peña *et al.*, 2011a).

El estudio abarca el período 1996-2008, de forma que se incluye desde su inicio el auge de las renovables eléctricas que se ha producido en España, mientras que se dejan fuera los efectos de la crisis económica presente sobre la demanda energética, que podrían falsear los resultados. Estos efectos no fueron muy perceptibles todavía en 2008, donde la demanda final de energía había caído solo un 2,6 por 100, cuando entre 2008 y 2009 cayó otro 7,4 por 100 (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2009-2010).

El modelo recibe como datos de entrada las capacidades instaladas de todas las tecnologías de generación eléctrica (y otros procesos de conversión energética) en 1996, y las demandas energéticas en 2008. El modelo busca entonces el suministro de mínimo coste para dichas demandas de 2008, invirtiendo en la capacidad extra necesaria en el sistema que permita abastecer el incremento de demanda que se produjo en el horizonte estudiado. A este proceso es necesario añadirle una restricción adicional: las emisiones de CO₂ en 2008 de este sistema energético óptimo, no pueden ser superiores a las que realmente se produjeron, de modo que el modelo no decida invertir en tecnologías intensivas en carbono, por mucho que éstas fueran las mejores para cubrir el incremento de demanda desde un punto de vista de minimización de coste. En otras palabras, el modelo representa las inversiones que, bajo una hipótesis de perfecta racionalidad regulatoria y mercados energéticos perfectos, se deberían haber producido entre 1996 y 2008, para minimizar el coste de abastecimiento energético en España sin sobrepasar el nivel de emisiones de 2008. La hipótesis de mercados perfectos es una presunción razonable y habitual en modelos de prospectiva energética a largo plazo, como los de la familia MARKAL/TIMES (Fishbone y Abilock, 1981 y Loulou *et al.*, 2005); y suponer racionalidad regulatoria perfecta es justo lo que permite hacer este análisis: estudiar qué políticas energéticas se deberían haber implantado bajo dicho supuesto.

Dado que se va a representar con un modelo estático (solo modela un año) de un período de 12 años, es necesario tener ciertas precauciones con los datos empleados. Los costes de las tecnologías representadas y los precios de los mercados internacionales de energía primaria y final, son el promedio de los que se produjeron en el período de estudio (1996-2008) medidos en euros constantes de 2008 para descontar el efecto de la inflación. Para comparar las políticas de reducción de demanda con las de promoción de renovables es necesaria su caracterización en el modelo. Se ha creado una base de datos de medidas de reducción de demanda. En dicha base solo se han considerado aquellas medidas que realmente hubieran sido facti-

GRÁFICO 1
DEMANDA DE CADA TIPO DE ENERGÍA EN CADA SECTOR EN 2008
 (PJ = EJ/1000)



FUENTE: IDAE.

bles tecnológicamente y a un coste razonable durante el período considerado. Por lo tanto, algunas de las medidas que más se barajan para el futuro, como la penetración masiva de vehículos eléctricos, se han dejado fuera de este estudio. Los datos de demanda de energía introducidos son, como ya se ha dicho, los reales correspondientes a 2008, tal cual se han obtenido del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2009). La demanda es por lo tanto exógena, y ade-

más se considera inelástica, salvo por las posibles reducciones derivadas de la aplicación de políticas de gestión de la demanda, que el modelo puede decidir aplicar si es apropiado desde el punto de vista de la minimización del coste de abastecimiento (aunque estas medidas llevan a su vez un coste de promoción asociado). Los valores de demanda utilizados, medidos en PetaJulios (PJ), son los que aparecen representados en el Gráfico 1, en donde se aprecian claramente algu-

CUADRO 1

DIFERENTES MEDIDAS DE POLÍTICA ENERGÉTICA MODELADAS:
COSTE ADICIONAL DE PROMOCIÓN Y EFECTOS ESTIMADOS

Descripción	Coste de promoción (millones €)	Efectos
Cursos de conducción ecológica para conductores particulares	2,0	Demanda gasolina y diesel en transporte por carretera, -1%
Incentivos a la videoconferencia en empresas	1,3	Demanda queroseno en transporte aéreo, -2,5%; demanda diesel y gasolina de automóviles, -1%; demanda electricidad de trenes, -0,01%
Campaña sobre presión adecuada en ruedas de coches	2,0	Demanda gasolina y diesel en transporte por carretera, -1%
Penetración de 7 por 100 de biocarburantes en 2008	0,0	Demanda gasolina y diesel en transporte por carretera en 2008, -5%
Incentivos a dispositivos de ahorro de combustible en coches	68,0	Demanda gasolina y diesel en transporte por carretera, -2%
Promoción de bicicleta en ciudades mayores a 200.000 habitantes	33,4	Demanda gasolina, -0,13% y demanda diesel en transporte por carretera, -0,03%
Plan renove de vehículos	13,0	Demanda gasolina, -2,2% y demanda diesel en transporte por carretera, +0,4%
Instalación de frenos regenerativos en ferrocarril suburbano	3,4	Demanda electricidad en transporte ferroviario, -3%
Incremento de impuestos a los carburantes	0,0	Diesel, -4%; gasolina, -4%; en electricidad en transporte ferroviario, +0,0001%
Peajes de acceso en ciudades mayores de 200.000 habitantes	7.435,0	Gasolina, -0,84%; diesel en transporte por carretera, -0,29%
Mejora de operaciones de tráfico aéreo	0,4	Queroseno en transporte aéreo, -1,82%
Fomento del transporte de mercancías por ferrocarril	971,0	Diesel en transporte por carretera, -0,4%; demanda electricidad en ferrocarriles, +20%
Transporte de mercancías por barco en Costa Atlántica	3,9	Diesel en transporte por carretera, -0,24%
Iluminación racional en sector residencial	422,0	Electricidad, sector residencial, -29%
Aire acondicionado racional en sector residencial	7.498,0	Electricidad, sector residencial, -24%
Calefacción racional en sector residencial	227,0	Electricidad, sector residencial, -15%
Electrodomésticos eficientes en sector residencial	1.191,0	Electricidad, sector residencial, -2%
Mejora de aplicaciones electrónicas en sector residencial	97,0	Electricidad, sector residencial, -3%
Incentivos a neumáticos de baja resistencia en automóviles	360,0	Demanda gasolina y diesel en transporte por carretera, -1,5%
Calentadores eficientes en sector residencial	932,4	Demanda de GLPs, gas natural, diesel y biomasa, sector residencial, -10%
Mejora envolvente térmica en sector residencial	6.475,0	Demanda de GLPs, gas natural, diesel y biomasa, sector residencial, -9,4%
Instalación de ventanas de doble cristal en sector residencial	5.180,0	Demanda de GLPs, gas natural, diesel y biomasa, sector residencial, -14%
Instalación de calefacción por suelo radiante en sector residencial	6.734,0	Demanda de GLPs, gas natural, diesel y biomasa, sector residencial, -2,4%
Solar térmica para agua caliente sanitaria en sector residencial	3.108,0	Demanda de GLPs, gas natural, diesel y biomasa, sector residencial, -19%

FUENTE: Elaboración propia.

nos rasgos importantes, como la gran demanda que los carburantes para transporte por carretera y aéreo suponen, o cómo los sectores residencial y terciario se abastecen principalmente de electricidad, gas natural y gases licuados del petróleo (GLPs) como propano y butano.

Las medidas de política energética que se han representado, como posibles alternativas a la promoción de renovables, son las que se pueden observar en el Cuadro 1. Para caracterizarlas se han tomado varios estudios de posibles medidas de eficiencia energética aplicables en España, donde aparecen sus costes, efectos y potenciales estimados (De la Villa, 2010; Fraunhofer *et al.*, 2009; Lorenzo, 2010; Ministerio de Fomento, 2011;

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2011 y WWF Spain, 2010). Posteriormente se han normalizado sus efectos y sus años para un solo año de estudio. Para ello, en las inversiones cuyos efectos duren varios años se ha calculado la anualidad de su amortización, desde una perspectiva gubernamental y no de inversor privado: baja tasa de interés (5 por 100) y bajo período de amortización (diez años, poco más que dos legislaturas). El coste de promoción se ha considerado como el coste adicional que un país ha de pagar por implantar dicha medida. Las medidas impositivas se han considerado con coste nulo, al adoptarse el supuesto simplificador de que no suponen distorsiones significativas en la economía.

Algunas decisiones se han considerado como fijas: la potencia nuclear instalada y las capacidades de las interconexiones de gas y electricidad son entradas al modelo, y este no las puede modificar (algo, por otra parte, no esperable, dado el corto plazo considerado y el elevado coste de las inversiones asociadas). Lo mismo ocurre con la capacidad de generación hidroeléctrica, que además presenta ciertas restricciones físicas en el caso de España. Por otro lado, se ha considerado ilimitada la capacidad de transporte de las redes de electricidad, gas y derivados del petróleo, aunque sí se ha usado un factor de pérdidas medio en cada una de ellas, así como un coste medio de transporte por cada unidad energética transportada.

La generación eléctrica, en la que interesa tener más detalle por la relevancia de las renovables, se ha representado mediante 20 tecnologías de generación: una nuclear, dos tipos de carbón, tres tipos de hidráulica, centrales de bombeo, ciclos combinados y turbinas de ciclo abierto de gas natural, generadores de fuel-gas, tres tipos de eólica terrestre con diferente calidad de recursos y diferente potencial máximo, una eólica marina, tres tipos de biomasa, residuos sólidos, solar fotovoltaica y, por último, solar térmica de concentración.

El refinado de petróleo se ha modelado usando tres refinerías tipo atendiendo a su complejidad: media, alta y muy alta. A mayor complejidad, mayor flexibilidad en la obtención de productos derivados y mayor proporción alcanzable de productos de alto valor añadido (destilados medios), pero a cambio de mayores costes de inversión y operación, mayores mermas y mayores emisiones. Como capacidad de refinado, se ha tomado como fija la de 2008, y no se consideran diferentes calidades en el petróleo crudo.

Respecto al modelado de la regasificación de gas natural licuado, se ha representado una terminal de referencia, con valores medios de costes de inversión y operación, eficiencias y emisiones. Se ha introducido como dato la capacidad de regasificación existente en España en 1996 y se permite al modelo la inversión en nueva capacidad.

Todas estas tecnologías (generación eléctrica, refinado y regasificación) se agrupan bajo la categoría de «tecnologías de conversión», y todas ellas llevan parámetros asociados para caracterizar su coste de inversión, período de amortización, tasa de rentabilidad exigida en la misma, costes variables y fijos de operación y mantenimiento, factor de pérdidas, capacidad instalada previa y límite de capacidad (si existiera), y factor de emisiones.

Las tecnologías de generación eléctrica llevan, además, asociados parámetros para caracterizar su flexibilidad en el suministro de reservas de operación al sistema eléctrico y su capacidad de suministrar potencia firme al mismo. Para una descripción más detallada de estos aspectos técnicos (consultar Batlle y Pérez-Arriaga, 2008).

Y, por último, las tecnologías de generación eléctrica renovable se han modelado mediante factores de carga, que son menores cuanto menor es la calidad del recurso renovable. Es por ello que, por ejemplo, la eólica se modela con tres tipos, la primera de alto recurso y alto factor de carga, la siguiente con valores menores, y la última con valores aún más pequeños. Cada una de estas tiene una potencia máxima, que representa la limitación en el potencial físico existente a cada nivel de recurso.

Se han considerado limitaciones a la disponibilidad anual de energía primaria producida en España (carbón nacional, biomasa y energía hidráulica), usando valores históricos extrapolando su tendencia. Se contabilizan, igualmente, los costes y las emisiones asociadas a la producción doméstica de cada tipo de energía (minería de carbón y cultivo de biomasa). Se supone capacidad ilimitada en las importaciones y exportaciones de energía tanto primaria como final, salvo en el caso de los gasoductos y las interconexiones eléctricas con África del Norte y Europa, donde se utilizan las capacidades medias en el período estudiado. Se hace la hipótesis de que los biocombustibles son importados en su totalidad y la biomasa térmica y eléctrica es doméstica.

Se ejecuta el modelo para los 96 niveles de carga en que se ha dividido el año, buscando representar la va-

CUADRO 2
RESUMEN DE LOS ESCENARIOS MODELADOS

Escenario	ER forzadas	PA permitidas	Emisiones restringidas
ER_NoPA_Real	Sí	No	No, valor «Real 2008» obtenido
NoER_NoPA	No	No	Real 2008
NoER_PA	No	Sí	Real 2008

FUENTE: Elaboración propia.

riabilidad de la demanda eléctrica de forma lo más fiel posible, especialmente en las puntas y los valles. Se establece un requerimiento de potencia firme de generación eléctrica instalada con un margen de reserva del 20 por 100 sobre la demanda anual de pico (valor similar al que existió en 2008). Se utilizan factores estadísticos para obtener la potencia firme que cada megavatio instalado proporciona al sistema. Se requiere, igualmente, que los generadores con mayor flexibilidad operativa provean al sistema de unas reservas de operación suficientes para cubrir el error medio en la previsión de la demanda (supuesto un 4 por 100 de la demanda en cada nivel de carga), la probabilidad de fallo en una gran central (considerada un 5 por 100 para una central de 1 GW), y el error de predicción en la producción de las tecnologías intermitentes (supuesto un 20 por 100 de la producción media anual). Para los datos numéricos detallados véase López-Peña *et al.*, 2011b.

3. Escenarios y resultados

Se han representado tres escenarios. El primero, que busca modelar la situación real que se ha producido en España en el período de estudio, obliga al modelo a instalar, para cada una de las tecnologías de generación eléctrica renovable (ER), la capacidad que realmente se ha observado en el sistema, además, no le permite hacer uso de las políticas adicionales modeladas (PA), que en la realidad no fueron aplicadas. A este escenario no

se le restringen las emisiones, pero dado que representa la realidad, debería producir un valor similar al realmente observado, permitiendo la calibración del modelo. En el siguiente escenario no se obliga al modelo a instalar renovables, pero sigue sin permitírsele hacer uso de las políticas adicionales, con el fin de aislar el efecto de las políticas de apoyo a las renovables. En el tercer escenario tampoco se impone la instalación de generación renovable, y sí se le permite el uso de las políticas adicionales. Además, en estos dos escenarios, el valor de emisiones obtenido en el primero (que debería ser muy similar al real de 2008) se impone como restricción de emisiones máximas.

En el Cuadro 2 se representan esquemáticamente los escenarios. Una restricción adicional, que se ha incluido en los tres escenarios, es la obligación de invertir en la misma capacidad de ciclos combinados que se ha observado en la realidad (casi 21 GW), por considerarse que es un hecho que puede condicionar de forma importante los resultados, y tras observar que el modelo no invierte tanto en dicha tecnología salvo que exista la restricción.

En el análisis de resultados se van a estudiar primero las emisiones en los tres escenarios. En el escenario «ER_NoPA_Real», donde las mismas no estaban limitadas, se obtienen unas emisiones de 315,88 MtCO₂, lo cual es un 1,7 por 100 superior al valor real de emisiones de CO₂ energético que se produjo en España en 2008, 310,6 MtCO₂. Esta pequeña diferencia permite validar la calibración de los datos del modelo. Este valor

CUADRO 3
PRECIOS SOMBRA DE LAS RESTRICCIONES DE CAPACIDAD (€/kW)

Variables duales (€/kW)	ER_NoPA_Real	NoER_NoPA	NoER_PA
CCGT >	91,09	78,37	87,29
CCGT <	0	0	0
Eólica >	113,19	0	0
Eólica <	0	0	0
Solar FV >	469,40	0	0
Solar FV <	0	0	0
Biomasa >	188,33	0	0
Biomasa <	0	0	0
Residuos >	391,05	0	0
Residuos <	0	0	0

FUENTE: Elaboración propia.

se introduce como restricción máxima en los otros dos escenarios, de forma que las emisiones en el escenario «NoER_NoPA» son efectivamente 315,88 MtCO₂, y las del escenario «NoER_PA» son 308,71 MtCO₂. Es decir, la restricción es activa en el segundo escenario, pero no así en el tercero, donde el modelo opta por aplicar políticas adicionales más allá, incluso, de la limitación de emisiones que se le impone, ya que esto permite minimizar el coste total del sistema.

Respecto a la nueva capacidad de generación eléctrica en la que el modelo invierte, se observa que la gran potencia instalada de ciclos combinados (fijada como una restricción) hace que exista sobrecapacidad en el sistema, por lo que el modelo no invierte en más capacidad en los escenarios «NoER_NoPA» y «NoER_PA». En el escenario «ER_NoPA_Real», se invierte además en la capacidad renovable que le viene impuesta.

Las restricciones del modelo, tanto la que fija la capacidad de ciclos combinados (CCGT) a su valor observado, como las que establecen la de cada tecnología renovable, se han desdoblado en una restricción de signo *menor o igual* y una de signo *mayor o igual* aplicadas simultáneamente (lo que equivale a fijar una restricción de signo *igual*). Esto permite determinar cuál de ellas es

activa, para analizar si el modelo preferiría aumentar o disminuir dicha capacidad. Los precios sombra¹ (variables duales) de dichas restricciones contienen valiosa información, que se representa en el Cuadro 3.

Se observa que la restricción de signo mayor e igual es siempre activa en el caso de los CCGTs, es decir, que el modelo siempre querría poder disminuir la potencia instalada, que le sobra capacidad de esta tecnología. Esto sucede con más intensidad (la función objetivo mejoraría en una mayor cuantía) en el caso de las renovables forzadas, pues hay más capacidad en el sistema. Tras dicho escenario, el siguiente donde más mejoraría la función objetivo al disminuir la capacidad de CCGTs es el que contempla políticas adicionales de reducción de la demanda, pues dichas políticas reducen la demanda, haciendo menos necesaria la nueva inversión. El hecho de que el modelo recomiende disminuir esta capacidad de CCGTs en todos los casos demuestra que la gran inversión que se ha producido ha sido subóptima *ex-post* desde el punto de vista de la minimización del

¹ En un problema de optimización lineal, los precios sombra de las restricciones permiten ver cómo mejoraría o empeoraría la función objetivo si dicha restricción se hiciese más laxa en una unidad.

CUADRO 4
COSTE TOTAL DEL ABASTECIMIENTO Y SUS COMPONENTES
(Millones de euros)

Componentes de coste (M€)	ER_NoPA_Real	NoER_NoPA	NoER_PA
Coste prod. de energía primaria doméstica (+) . . .	4.129,1	2.997,4	4.073,3
Coste importaciones de energía primaria (+)	7.460,4	9.734,5	7.518,7
Coste variables de conversión de energía (+)	778,0	790,1	730,9
Coste de transporte de energía (+)	8.068,2	8.578,4	7.357,1
Coste importaciones de energía final (+)	19.495,3	19.494,5	18.238,4
Ingreso exportaciones de energía final (-)	-1.011,0	-1.011,4	-1.011,0
Coste fijos de conversión de energía (+)	2.153,7	1.496,2	1.520,7
Coste de inversión en nueva capacidad (+)	4.934,3	1.887,8	1.844,2
Coste de promoción de políticas adicionales (+) . . .	0,0	0,0	840,0
Coste de las reservas de operación eléctrica (+) . . .	57,3	37,7	37,7
Coste total del abastecimiento de energía.	46.065,4	44.005,1	41.149,9

FUENTE: Elaboración propia.

coste social. Las restricciones de signo mayor son también activas en todas las tecnologías renovables en el caso donde éstas están forzadas: el sistema tiene tal sobrecapacidad de CCGTs que no necesita la capacidad renovable. De las diversas tecnologías, la que más cara resulta es la solar fotovoltaica, posteriormente los residuos y la biomasa, siendo la más competitiva la eólica, como cabría esperar.

Como se ha dicho, el modelo trata de minimizar el coste total del abastecimiento energético. Si se analiza el valor de dicho coste² y de sus componentes en cada uno de los escenarios (Cuadro 4), se observa que el caso real tiene un coste total de unos 2.000 millones de euros superior al segundo escenario, y la única diferencia entre ambos es la obligación de instalar tecnologías renovables. Este incremento de coste se puede por tanto asociar a la promoción de renovables, y se comprueba que efectivamente ese valor está en el orden de magnitud del

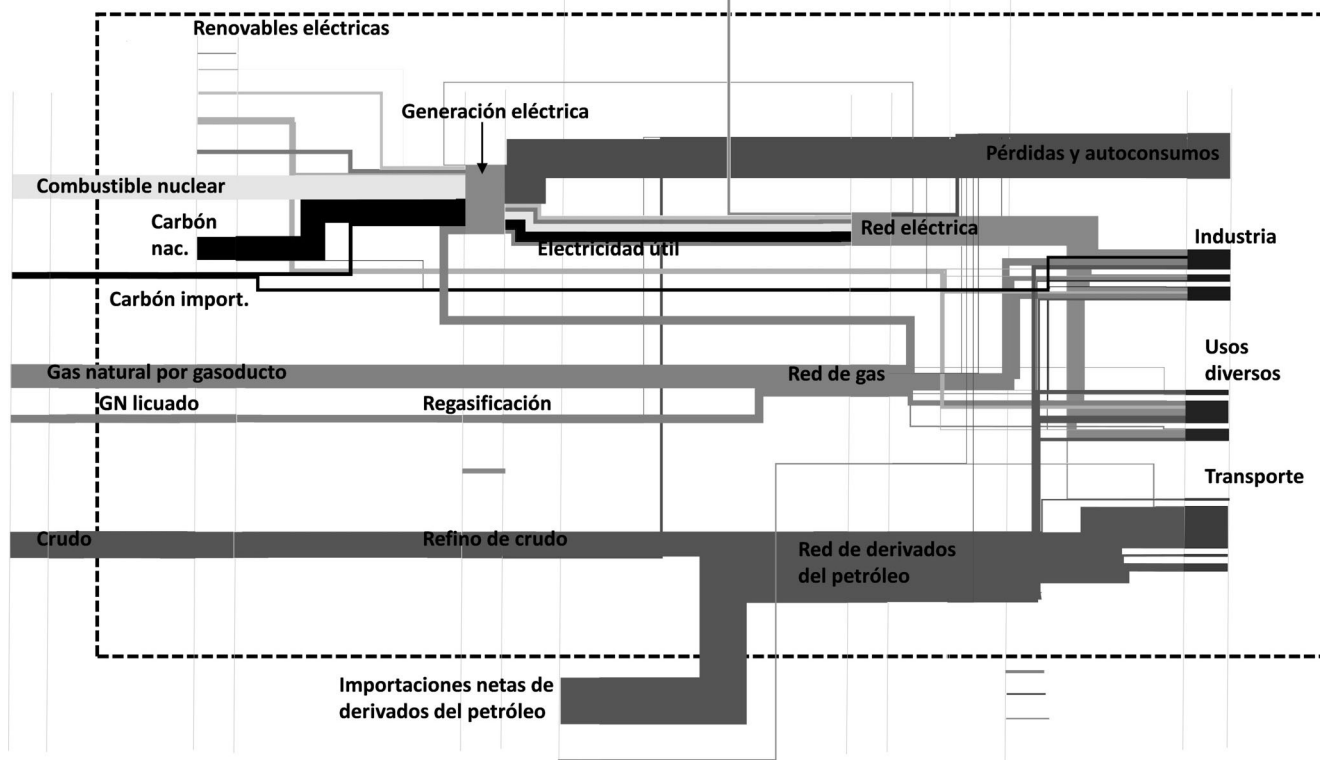
coste real de promoción de renovables en 2008. En el escenario «NoER_PA», el coste es de unos 3.000 millones de euros menor al escenario «NoER_NoPA», debido a que las políticas adicionales, aunque representan un coste de unos 800 millones de euros, producen unos ahorros sustanciales en importaciones de energía y en otros costes. Es decir, priorizar las políticas de ahorro y eficiencia energética hubiera podido ahorrar al sistema unos 5.000 millones de euros anuales, para lograr la misma reducción de emisiones. Dado que existen compromisos internacionales en materia de energías renovables, otra forma de interpretar estos resultados es que las políticas de ahorro hubieran permitido lograr una reducción de emisiones mayor que la actual, a un coste inferior, con toda seguridad facilitando que en la actualidad cumpliéramos el compromiso adquirido en el marco del Protocolo de Kioto.

De nuevo, recordamos que solo estamos considerando el coste económico, y no otros beneficios potenciales tanto del desarrollo de una industria renovable como de una basada en la eficiencia energética.

Por último, y como aspecto novedoso de esta metodología, el modelo permite representar los flujos ener-

² Estos costes no se han de considerar como valores reales, pues por ejemplo toda la capacidad de 1996 se está suponiendo como ya amortizada. Lo realmente útil es comparar costes entre dos escenarios.

FIGURA 1
 DIAGRAMA DE SANKEY DE LA ENERGÍA EN ESPAÑA EN 2008,
 BAJO LAS HIPÓTESIS DEL ESCENARIO «ER_NOPA_REAL»



FUENTE: Elaboración propia.

géticos en cada uno de los tres escenarios mediante los llamados diagramas de Sankey, tal y como se muestra en las tres figuras siguientes. Estos diagramas, introducidos y explicados en detalle en López-Peña *et al.*, 2011c, constituyen una forma sencilla e intuitiva de ver los efectos de las diferentes políticas que se estudian, así como sus valores relativos. La línea negra de puntos representa la frontera española, y la energía fluye de izquierda a derecha, desde las importaciones de energía primaria a las conversiones energéticas, las redes de transporte de energía final, y los consumos en los tres

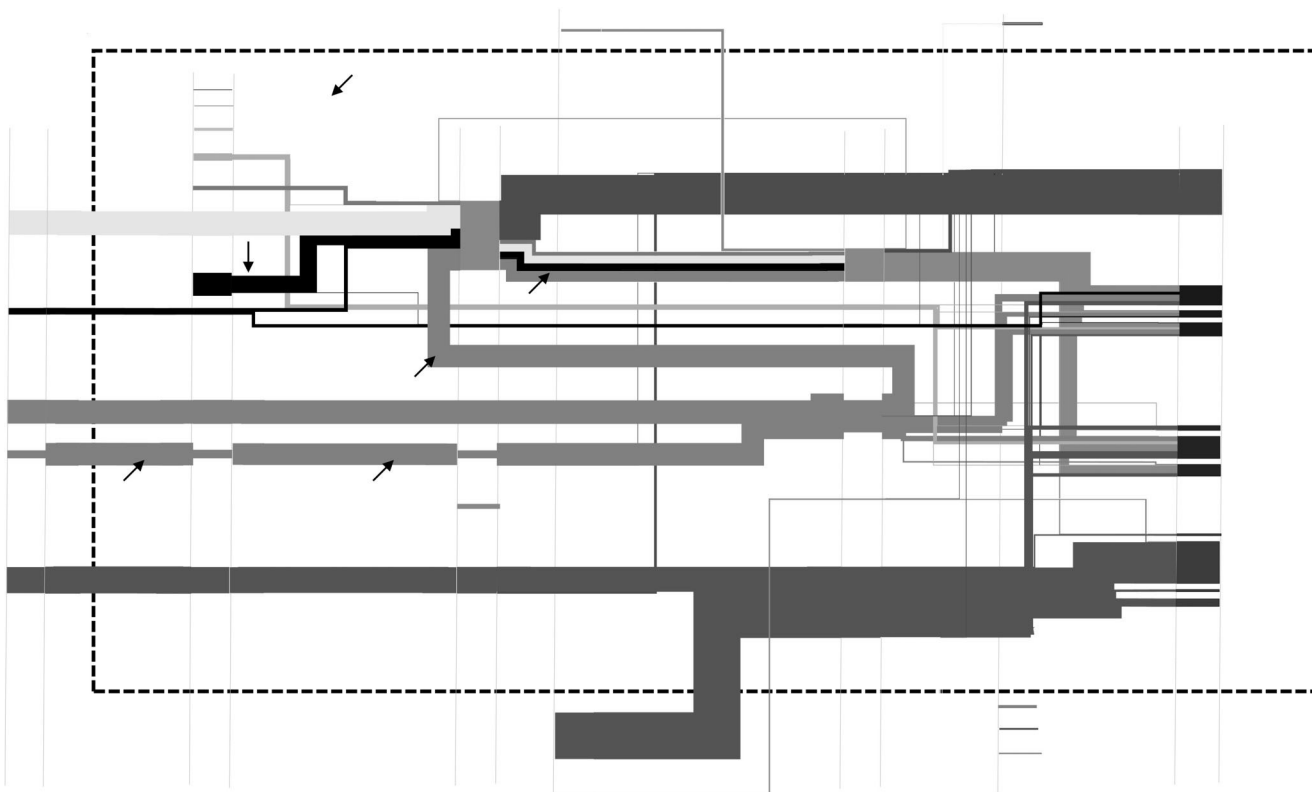
sectores demandantes, a su vez divididos en los subsectores descritos anteriormente. En la primera figura se añaden rótulos para identificar los elementos, y en las otras dos se indica brevemente qué efectos son observables en cada escenario.

4. Conclusiones

Los resultados del estudio presentado arrojan dos conclusiones principales. En primer lugar, que la reducción de emisiones en el período considerado podría ha-

FIGURA 2

DIAGRAMA DE SANKEY DE LA ENERGÍA EN ESPAÑA EN 2008,
BAJO LAS HIPÓTESIS DEL ESCENARIO «NOER_NOPA»



Efectos observables (ver flechas): no existe generación con renovables, y ya que los CCGTs están impuestos, los usa para generar lo que no aportan las renovables. Eso se traduce en mayores importaciones de GNL (los gasoductos ya están saturados), y mayor regasificación. El incremento de emisiones que ello supone, y la restricción (activa) a las mismas obliga a disminuir generación con carbón nacional.

FUENTE: Elaboración propia.

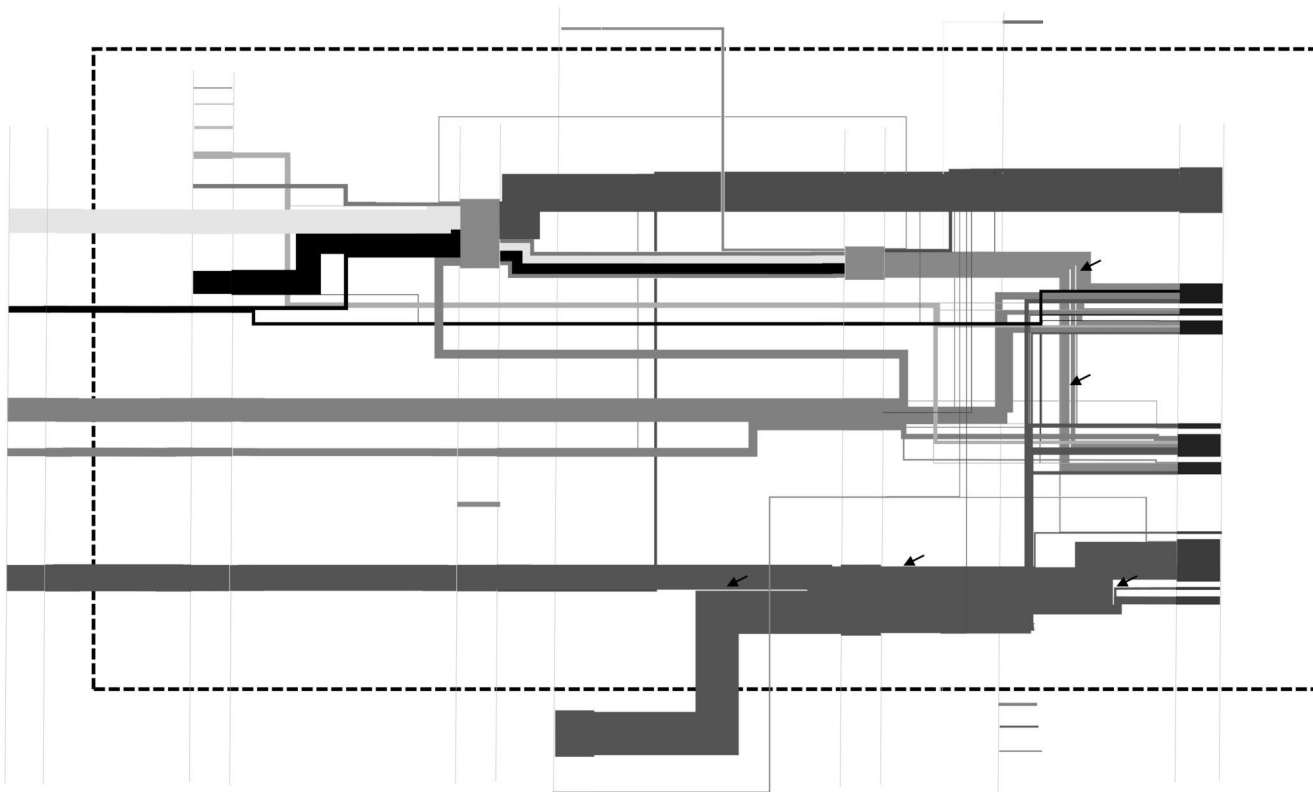
berse logrado a menor coste mediante el estímulo de medidas de ahorro y eficiencia energética, campo en el que España cuenta con un potencial significativo. Por supuesto, cabe preguntarse por qué, si tan rentables hubieran resultado, no se adoptaron este tipo de políticas. Una posible respuesta es que las medidas de eficiencia energética, aunque económicamente rentables, resultan difíciles de implantar por la existencia de barreras y costes adicionales (véase, por ejemplo, Labandeira y Li-

nares, 2010). Pero ello no quiere decir que no deban llevarse a cabo, sino más bien que hacen falta políticas adecuadas que eliminen estas barreras. Por tanto, la conclusión es que priorizar el ahorro y la eficiencia energética como estrategia de reducción de las emisiones de CO₂, y por encima de otras políticas energéticas, es muy recomendable.

Nótese en todo caso que este trabajo no defiende eliminar el apoyo a las energías renovables: como ya se ha

FIGURA 3

DIAGRAMA DE SANKEY DE LA ENERGÍA EN ESPAÑA EN 2008,
BAJO LAS HIPÓTESIS DEL ESCENARIO «NOER_PA»



Efectos observables (ver flechas): en este caso se genera lo mismo con gas y carbón que en el caso "ER_NoPA_Real", a pesar de que no cuenta con las renovables. Decide disminuir demanda eléctrica (aplicando las políticas adicionales), antes que generar más electricidad. También se reduce demanda de otros tipos de energía final, y por eso se emite menos y la restricción de emisiones no es activa.

FUENTE: Elaboración propia.

mencionado, estas energías tienen beneficios muy importantes desde el punto de la sostenibilidad del modelo energético a largo plazo no considerados en este estudio. Posiblemente sería necesario extender su apoyo más allá del sector eléctrico. Además, existen compromisos internacionales que obligan a lograr un porcentaje de participación de este tipo de tecnologías en el sector energético. Pero lo que sí es claro es que, desde el punto de vista de la reducción de emisiones de CO₂, el apoyo a

las renovables eléctricas no puede ser la única medida efectiva, por los resultados ya comentados. De hecho, y dado que las políticas de renovables son irrenunciables (por los compromisos internacionales adquiridos), otra interpretación de esta conclusión es que, añadidas a las políticas de renovables, las medidas de ahorro propuestas nos hubieran llevado a cumplir con nuestros objetivos en materia de reducción de emisiones de CO₂ a un coste muy pequeño.

La segunda conclusión es que existe una elevada sobrecapacidad de ciclos combinados, es decir, que se invirtió en ellos más de lo económicamente óptimo (*ex-post*). Esta sobreinversión tiene también consecuencias sobre los resultados, ya que supone un sobre-coste para el sistema sin alterar el total de emisiones. De hecho, las políticas de ahorro energético dan lugar a una sobreinversión aún mayor.

También es interesante reflexionar sobre otras implicaciones del estudio: como se indicaba en el apartado 2, el transporte (especialmente por carretera) sigue representando una gran proporción del consumo de energía (y de las emisiones de CO₂) en España. Por tanto, y mientras no se electrifique significativamente el transporte, las políticas de renovables tendrán una eficacia limitada en este sector (solo mediante las obligaciones de uso de biocombustibles), lo que también afecta a su eficiencia económica. En este sentido, el extender las políticas de reducción de emisiones al sector transporte y residencial conseguirá siempre abaratar el coste de la reducción, como ya se ha mostrado en otros estudios (Labandeira *et al.*, 2009). Esta extensión resulta natural para las medidas de ahorro, así como para otras medidas de tipo fiscal.

Por tanto, la conclusión principal de este trabajo es que el ahorro energético en todos los sectores (que se distingue expresamente de la eficiencia energética por la posibilidad de efecto rebote en esta última) debe ser la primera prioridad en todas las estrategias dirigidas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, además de contribuir también a la reducción de la dependencia energética. Se debe constituir pues en la pieza fundamental de cualquier política energética que pretenda lograr un modelo energético sostenible.

Referencias bibliográficas

- [1] BATLLE, C. y PÉREZ-ARRIAGA, I. (2008): «Design Criteria for Implementing a Capacity Mechanism in Deregulated Electricity Markets». *Utilities Policy*, 16(3), 184-193.
- [2] DE LA VILLA, A. (2010): *Propuestas sectoriales de políticas de eficiencia energética en el sector del transporte*. Universidad Pontificia Comillas.
- [3] ENKVIST, P. A.; NAUCLÉR, T. y ROSANDER, J. (2007): «A Cost Curve for Greenhouse Gas Reduction». *McKinsey Quarterly*, 1, 34.
- [4] FISHBONE, L. G. y ABILOCK, H. (1981): «MARKAL, A Linear-Programming Model for Energy Systems Analysis: Technical Description of the BNL Version». *International Journal of Energy Research*, 5(4), 353-375.
- [5] FRAUNHOFER ISI, ENERDATA, INSTITUTE OF STUDIES FOR THE INTEGRATION OF SYSTEMS ISIS, VIENNA TECHNICAL UNIVERSITY, & WUPPERTAL INSTITUTE FOR CLIMATE, ENVIRONMENT AND ENERGY WI. (2009): *Study on the Energy Savings Potentials in EU MemberStates, Candidate Countries and EEA Countries. Final Report*.
- [6] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (2009): *Informe Anual de Consumos Energéticos. Año 2008*.
- [7] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (2010): *Informe Anual de Consumos Energéticos. Año 2009*.
- [8] LINARES, P. y LABANDEIRA, X. (2010): «Energy Efficiency Economics and Policy», with X. Labandeira. *Journal of Economic Surveys*, 24: 573-592.
- [9] LABANDEIRA, X.; LINARES, P. y RODRÍGUEZ, M. (2009): «An Integrated Approach to Simulate the Impacts of Carbon Emissions Trading Schemes», with X. Labandeira, M. Rodríguez. *The Energy Journal*, Special Issue. Climate Change Policies after 2012: 217-237.
- [10] LÓPEZ-PEÑA, Á.; DANESIN, A.; LINARES, P.; PÉREZ-ARRIAGA, I.; FERNÁNDEZ, A. y DIAS BLEASBY, R. (2011c): *Observatorio de Energía y Sostenibilidad en España 2010*. Madrid: BP Chair On Energy and Sustainability.
- [11] LÓPEZ-PEÑA, Á.; LINARES, P. y PÉREZ-ARRIAGA, I. (2011a): «POEMS: A Policy-Oriented Energy Optimization Model with Sustainability Considerations». *Working Paper IIT-11-157A*.
- [12] LÓPEZ-PEÑA, Á.; LINARES, P. y PÉREZ-ARRIAGA, I. (2011b): *Renewables in the Spanish Energy Sector: A Cost-Efficiency Evaluation for CO₂ Emissions Reduction*. Presented at the Workshop «The Cost of Renewable Energy in the EU», European University Institute, Florence, Italy.
- [13] LORENZO, J. (2010): *Propuestas sectoriales de políticas de eficiencia energética en el sector residencial*. Universidad Pontificia Comillas.
- [14] LOULOU, R.; REMNE, U.; KANUDIA, A.; LEHTILA, A. y GOLDSTEIN, G. (2005): *Documentation for the TIMES Model, Part I: General Description of the TIMES Paradigm*.

[15] MENDILUCE, M.; PÉREZ-ARRIAGA, I. y OCAÑA, C. (2010): «Comparison of the Evolution of Energy Intensity in Spain and in the EU15. Why Is Spain Different?». *Energy Policy*, 38(1), 639-645. doi:10.1016/j.enpol.2009.07.069.

[16] MINISTERIO DE FOMENTO (2011): *Plan de Ahorro, Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones en el Transporte y la Vivienda*. Gobierno de España.

[17] MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO (2011): *Borrador definitivo del Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020*.

[18] WWF SPAIN (2010): *Potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO2 del parque residencial existente en España en 2020*.