

economics for energy

WP 06/2012

Energías Renovables y Cambio
Climático

Xavier Labandeira
Pedro Linares
Klaas Würzburg

Energías Renovables y Cambio Climático

Xavier Labandeira^a, Pedro Linares^b y Klaas Würzburg^a

Resumen

Cambio climático y energía son dos caras de la misma moneda. Por ello, para afrontar con éxito el problema del cambio climático es necesario un cambio importante en los sistemas energéticos actuales. Sin embargo, la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero ha sido limitada hasta el momento, en buena medida por las características del cambio climático: externalidad global y dinámica sujeta a numerosas incertidumbres. Independientemente de una mayor o menor cooperación internacional, no obstante, hay razones (no solo climáticas) para actuaciones unilaterales y, dentro de éstas, las energías renovables han de jugar un papel fundamental. En este trabajo resumimos las principales conclusiones de los estudios prospectivos sobre el protagonismo de las fuentes renovables en los sistemas energéticos futuros. También subrayamos la importancia de una adecuada definición de políticas para que las energías renovables contribuyan de forma significativa a la mitigación de gases de efecto invernadero.

Clasificación JEL: Q42, Q47, Q54, Q58

Palabras clave: Mitigación, sistemas de promoción, prospectiva

Renewable Energy and Climate Change

Abstract

Energy and climate change are closely related. That is why a fundamental change in current energy systems would be necessary to successfully tackle climate change. However, there has been limited greenhouse gas emission mitigation so far due to the characteristics of climate change: a global and dynamic externality that is subject to uncertainty. Yet even in absence of international coordination, there might be reasons (including those unrelated to climate change) for unilateral actions and, within them, renewable energies must play a key role. In this paper we present the main conclusions of prospective studies on the relevance of renewable sources in future energy systems. We also underline the relevance of a proper policy definition so that renewable energies contribute to greenhouse gas mitigation in a significant manner.

JEL classification: Q42, Q47, Q54, Q58

Keywords: Mitigation, prospective, promotion schemes

^a Rede (Universidade de Vigo) y Economics for Energy; ^b Universidad Pontificia Comillas y Economics for Energy. Agradecemos los comentarios y sugerencias de Emilio Cerdá así como del grupo de expertos sobre energía creado por el gobierno vasco en 2011. Asimismo, reconocemos el apoyo económico de la Fundación Alcoa y del FEDER y Ministerio de Economía y Competitividad (proyecto ECO2009-14586-C02-01). No obstante, todos los errores y omisiones son de nuestra única responsabilidad.

1. Introducción

Cambio climático y energía son dos caras de la misma moneda: buena parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provienen del sector energético en sus diversas formas (incluyendo transporte). Es por ello que la solución al problema pasa por un cambio fundamental en el sistema energético, que en gran medida solo será posible con una mayor participación de las renovables en el mix de energías.

En este trabajo nos ocupamos, en el marco de este número especial, de las energías renovables como respuesta a la problemática del cambio climático. Somos conscientes, por supuesto, de que hay otras alternativas en el ámbito energético para mitigar las emisiones de GEI, principalmente la eficiencia energética (ver, por ejemplo, Economics for Energy, 2011) pero también el uso más intenso, en términos sustitutivos, de combustibles fósiles más eficientes en términos de GEI o la captura y almacenamiento de carbono, y también de que hay otras razones extra-ambientales para promover el desarrollo de las tecnologías renovables (seguridad energética, efectos positivos sobre la economía, etc.) tal y como tratarán otros artículos de este número especial de forma monográfica.

El artículo tiene como objetivo fundamental describir las implicaciones para las energías renovables de los escenarios energéticos que consideran los principales análisis prospectivos (Sección 3). Obviamente, el importante papel de las energías renovables tiene que ver con sus beneficios climáticos por lo que, en el siguiente apartado nos ocupamos de revisar los principales aspectos del cambio climático y su corrección. En la cuarta sección repasamos el potencial tecnológico de las energías renovables, lo que da paso a una discusión sobre las políticas climáticas y la promoción de las renovables en el quinto apartado.

A lo largo del artículo seguimos una aproximación general, sin entrar en detalle en las distintas alternativas tecnológicas que se pueden desarrollar en este ámbito y de las que se ocuparán los distintos artículos dedicados en este número a las principales opciones existentes en la actualidad. No obstante, sí pondremos un énfasis especial en que el mix tecnológico renovable busque el denominado coste-efectividad: mínimos costes y la máxima potencialidad productiva (o aplicabilidad).

2. El cambio climático y su corrección

El cambio climático se ha venido configurando como uno de los principales desafíos para las sociedades contemporáneas. En la actualidad hay un alto consenso científico sobre las causas y efectos del cambio climático, tal y como reflejan los informes del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático de la ONU (IPCC) desde comienzos de los noventa. Así, pocos discuten hoy la vinculación entre cambio climático y las emisiones de GEI de origen humano,

mayoritariamente producidas por la combustión fósil para suministrar servicios vinculados a la energía. Como indicamos con anterioridad, energía y cambio climático son dos caras de una misma moneda, lo que exige tomar decisiones difíciles porque por un lado el cambio climático tendrá importantes efectos (globalmente negativos) sobre el bienestar humano pero, por otro, el sector energético garantiza la cobertura de necesidades humanas básicas como iluminación, calefacción, movilidad o comunicación.

Los efectos asociados a fenómenos de cambio climático son diversos. En su último informe de evaluación el IPCC (2007) enumera algunas de las consecuencias vinculadas a la subida de temperaturas y otras modificaciones en el clima de la tierra: mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, subida en el nivel del mar, pérdida de tierra útil para el cultivo y por ello mayor escasez de alimentos, redistribución de los recursos hídricos, pérdidas de biodiversidad, intensificación de flujos migratorios, etc.

Desafortunadamente, la complejidad de los sistemas climáticos y las limitaciones en el conocimiento científico no permiten definir con exactitud las consecuencias del cambio climático, que están sujetas por tanto a una importante incertidumbre. Incertidumbre que, por otro lado, no solo se relaciona con las limitaciones de la ciencia del clima sino también con las dificultades para transportar la modelización de nuestras sociedades (preferencias) y tecnologías en el largo y muy largo plazo. Ello dificulta tremendamente la definición de objetivos basados en análisis coste-beneficio y ha dado paso a decisiones más discrecionales. De hecho, esto explica que las últimas cumbres climáticas (desde Copenhague) pivoten en torno al objetivo de mantener la subida media de temperaturas globales dentro de 2 grados Celsius, un nivel que se considera (exógenamente) umbral de cambios importantes para los sistemas ecológicos y económicos en el planeta. Como veremos a continuación, a día de hoy este objetivo es tan ambicioso que ha de llevar a una alta descarbonización del sistema energético hacia mediados de este siglo, prácticamente total en las economías avanzadas.

Así, los estudios recientes del IPCC (2011) e IEA (2011) indican que se está cerrando la ventana de poder limitar el aumento de temperaturas a 2°C. Así, la Agencia Internacional de la Energía considera que la temperatura global media se incrementaría en torno a 3.5°C, incluso si los países aplicasen todas las medidas acordadas en la conferencia de Cancún. De hecho, si las emisiones siguen creciendo al ritmo actual, el aumento de temperaturas se aproximaría a los 6°C con respecto a la situación pre-industrial. Esto indica la insuficiencia de los esfuerzos actuales para combatir el cambio climático y las dificultades para lograr acuerdos internacionales que alcancen los objetivos fijados.

En realidad, lo anterior es un reflejo de la configuración del cambio climático como una externalidad negativa que manifiesta un fallo institucional del mercado, que no contempla los costes de las emisiones de GEI en sus intercambios. En realidad nos encontramos ante una externalidad “perfecta”, de gran magnitud potencial, global, con efectos dinámicos y sujeta a importantes incertidumbres. Solo una de esas características dificultaría grandemente la solución

de esta externalidad, haciéndola diferente de cualquier otro problema ambiental al que se haya enfrentado la humanidad hasta el momento, pero la confluencia de tamaño y efectos de largo plazo con un alcance global del problema e incertidumbres hacen extremadamente compleja su solución. Si a lo anterior unimos las importantísimas consecuencias económicas del control de las emisiones de GEI, por la ya mencionada relación entre energía y cambio climático, los obstáculos a un acuerdo internacional son evidentes. Además, Prins et al. (2010) avanzan una hipótesis alternativa para explicar las limitaciones de las negociaciones climáticas internacionales. Argumentan así que existe una sensación social de 'irresolubilidad' del problema, como en el caso de la pobreza mundial o de la cura del cáncer, además de interpretarse como un ataque a la forma de vida actual, lo que dificulta su tratamiento adecuado por parte de los decisores públicos y privados. Esto es evidente en algunos países, en los que la transformación requerida del sistema energético supondría unos costes elevados. En China, por ejemplo, el aumento simultáneo de población y capacidad económica introducen fuertes demandas sobre el sector energético cuyas restricciones pueden ser percibidas como una amenaza al modelo de crecimiento económico. La situación de EE.UU. respecto al gas natural, aunque menos extrema, presenta similitudes y refleja el rechazo de muchos países a ajustar sus sistemas energéticos a los nuevos objetivos climáticos a costes elevados.

Por ello puede decirse que los distintos gobiernos se encuentran en una posición difícil, siendo conscientes de las grandes transformaciones que necesitan sus sistemas energéticos pero sin que exista un acuerdo global por las características de la externalidad climática. Este contexto ha sido abordado por numerosas aportaciones desde la ciencia económica, cuyo análisis o mera enumeración se encuentra más allá de las posibilidades de este trabajo. Buena parte de las aportaciones se han centrado en la definición de sistemas que posibiliten la consecución de acuerdos, favoreciendo la negociación a pequeña escala, los procesos transparentes de verificación, los horizontes temporales próximos y la adopción de medidas coste-eficientes (véanse por ejemplo Tirole, 2009; Olmstead y Stavins, 2010).

Cualquiera que sea la solución al problema no-cooperativo del cambio climático, las energías renovables han de jugar un papel fundamental. De hecho, estas tecnologías pueden permitir la reducción a gran escala de las emisiones de GEI si se convierten en alternativas económica y técnicamente viables a las fuentes energéticas fósiles convencionales. Ello permitiría solucionar uno de los fenómenos que limitan los avances en este campo puesto que la corrección del cambio climático dejaría de verse como una amenaza al estilo de vida actual o a las posibilidades de crecimiento económico. Por ello, la innovación y el avance tecnológico son fundamentales para el éxito de las estrategias contra el cambio climático, lo que ha llevado a muchos gobiernos a actuar en este sentido mediante políticas que promuevan el avance tecnológico de estas alternativas y su implantación y despliegue en la práctica (véase Sección 5).

3. Cambio Climático, proyecciones energéticas y renovables

Un futuro sostenible implica reforzar el ahorro energético y apoyar las tecnologías energéticas con bajas o nulas emisiones de CO₂, sobre todo las renovables (RE). En esta sección utilizaremos los escenarios energéticos sostenibles que han desarrollado diferentes organismos e instituciones internacionales como la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el Instituto de Prospectiva Tecnológica de la Comisión Europea (IPTS), el *Roadmap 2050* de la Comisión Europea (EC, 2011) o el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). A partir de ellos evaluaremos el potencial y la participación de las energías renovables en los escenarios energéticos.

Como punto de partida, la IEA anunció recientemente que las emisiones de CO₂ en el año 2010 fueron las más altas de la historia, a pesar del contexto recesivo de la mayor parte de las economías avanzadas del planeta. Este dato pone en evidencia lo difícil que resultará alcanzar objetivos como los fijados en las últimas conferencias de las partes y a los que nos referimos con anterioridad. En cualquier caso, la ambición del objetivo buscado tendrá importantes efectos sobre la configuración de los sistemas energéticos globales y sobre la participación de las energías renovables en éstos.

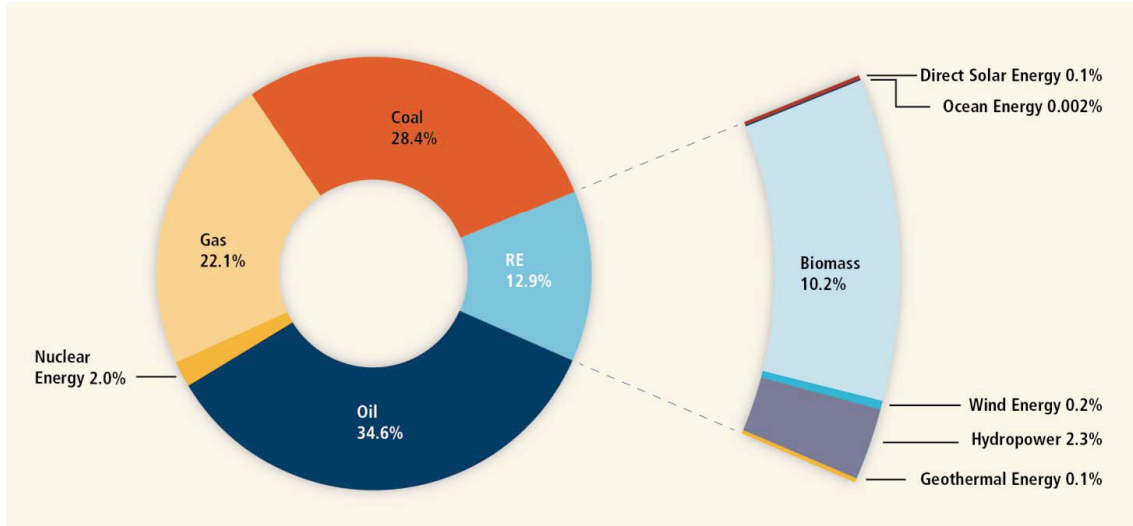
3.1 La importancia de las energías renovables en los escenarios globales

Para evaluar el papel que pueden jugar las renovables en reducir las emisiones de GEI hay que analizar cómo cambia el mix energético dentro de los escenarios descritos, partiendo de la situación actual. Así, según datos del informe especial del IPCC (2011) sobre fuentes de energías renovables y mitigación del cambio climático (SRREN), en 2008 la energía renovable representó globalmente el 12,9% de la energía primaria. La mayor aportación la realizó la biomasa (10,2%) con un 60% de utilización de biomasa tradicional para calefacción y para cocinar en países en desarrollo, y un menor papel de la energía hidráulica (2,3%). Adicionalmente, en 2008 las energías renovables contribuyeron un 12,9% en la generación eléctrica, tal y como se observa en la Figura 1.

Todos los escenarios futuros analizados asumen un mayor papel de las energías renovables en los sistemas energéticos. La Figura 2 ilustra la importancia de diferentes medidas de reducción de emisiones (en Mt CO₂) y las diferencias entre diferentes regiones del escenario del IPTS (2009). El área gris recoge las emisiones en el escenario de reducción del IPTS, y el conjunto de las áreas coloreadas las emisiones según tendencia. En consecuencia, cada una de las áreas refleja la contribución de diferentes esfuerzos adicionales de ahorro de emisiones (con respecto a la evolución tendencial) en el escenario de reducción. Se puede observar que todos los escenarios cuentan con una combinación de renovables, eficiencia energética, captura y almacenamiento de carbono (CCS), y energía nuclear. Por eso la participación y coste de las

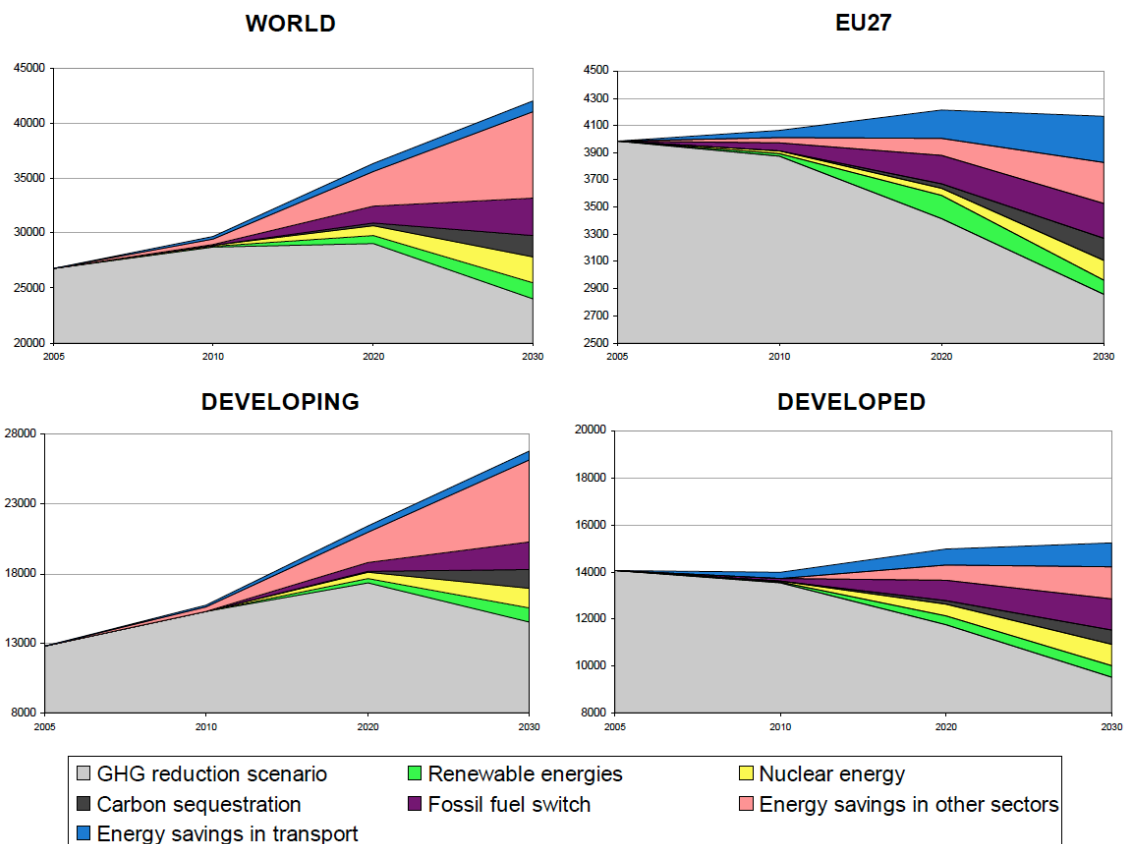
energías renovables dependen fuertemente del comportamiento de las demás tecnologías disponibles con bajas emisiones de GEI (y viceversa).

Figura 1. Contribución de distintas fuentes a la energía primaria global



Fuente: IPCC (2011)

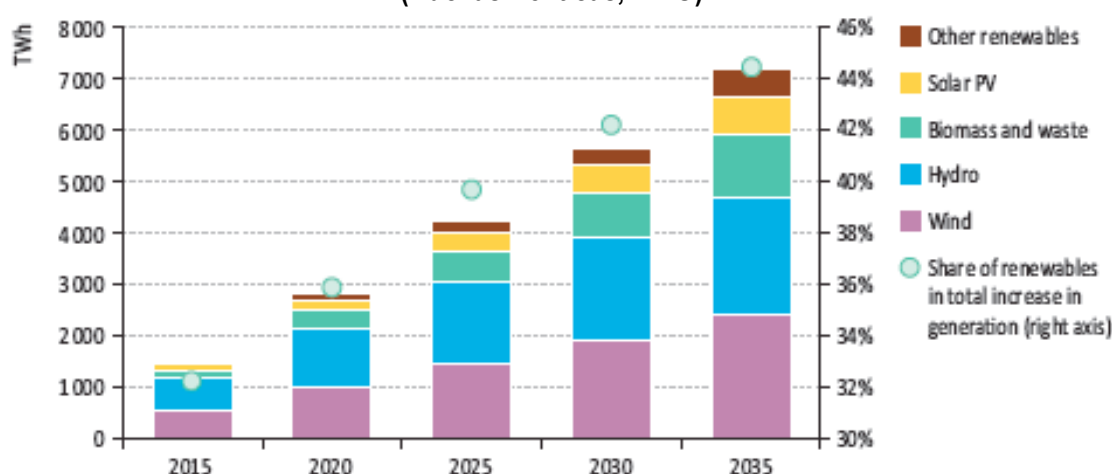
Figura 2. Emisiones de GEI y contribución de las distintas tecnologías energéticas



Fuente: IPTS (2009)

A continuación nos referimos a las previsiones dentro del grupo de energías renovables. En el escenario de nuevas políticas de la Prospectiva Energética Mundial (WEO) de la IEA, que asume la introducción de compromisos similares a los alcanzados en las últimas cumbres climáticas¹, la producción basada en energías renovables se triplica entre 2009 y 2035. La Figura 3 presenta el aumento de producción (en la generación eléctrica) por cada tipo de tecnología renovable en este escenario. El fuerte incremento de las renovables se atribuye principalmente a las tecnologías eólica e hidráulica porque, aunque la energía solar fotovoltaica muestra un rápido aumento en el WEO, su participación en la generación global solo alcanza el 2% en 2035.

Figura 3. Incremento de la generación eléctrica de fuentes renovables respecto a 2009 (Nuevas Políticas, WEO)



Fuente: IEA (2011)

Tabla 1. Demanda energética primaria en los escenarios del WEO 2011 (Mtoe)

	Escenario de Nuevas Políticas		Escenario de Políticas Actuales		Escenario 450			
	1980	2009	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Carbón	1.792	3.294	4.083	4.101	4.416	5.419	3.716	2.316
Petróleo	3.097	3.987	4.384	4.645	4.482	4.992	4.182	3.671
Gas	1.234	2.539	3.214	3.928	3.247	4.206	3.030	3.208
Nuclear	186	703	929	1.212	908	1.054	973	1.664
Hidráulica	148	280	377	475	366	442	391	520
Biomasa y residuos	749	1.230	1.495	1.911	1.449	1.707	1.554	2.329
Otras renovables	12	99	287	690	256	481	339	1.161
Total	7.219	12.271	14.769	16.961	15.124	18.302	14.185	14.870

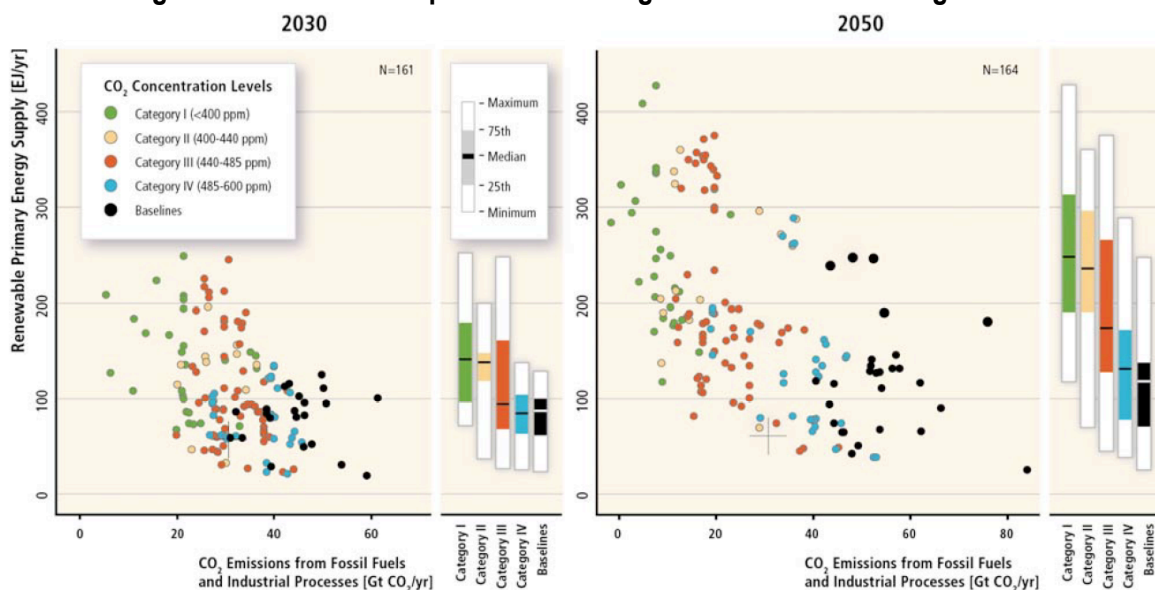
Fuente: IEA (2011)

¹ La IEA (2011) define tres escenarios en su WEO. El primer escenario, políticas actuales, modela la situación sin esfuerzos adicionales (*business as usual*). El escenario 450 lleva a que se mantengan las concentraciones atmosféricas de GEI en unos niveles que limiten el aumento de la temperatura a los 2 °C. El escenario de políticas nuevas es un escenario intermedio, compuesto a partir de las propuestas de reducción de emisiones presentadas en la reunión de Copenhague de 2009 (y posteriormente recogidos en Cancún) e insuficiente para controlar el aumento de temperaturas al nivel del escenario 450.

Obviamente, el escenario 450 del WEO asume un importante aumento de las energías renovables instaladas: desde 1.489 Mtep en el escenario de nuevas políticas a 2.098 Mtep para el escenario 450 (valores para el año 2035 en ambos casos). La Tabla 1 recoge las características del mix energético en los diferentes escenarios del WEO 2011. Respecto a su distribución geográfica, China encabeza la producción eólica y fotovoltaica en todos los escenarios, siendo a la vez el principal suministrador de estos equipos. También hay grandes expectativas para el desarrollo de la energía solar en Oriente Medio y Norte de África. Por su parte, la hoja de ruta europea (EC, 2011) prevé una participación de renovables de por lo menos 55% de la energía final consumida en el año 2050².

Por otro lado, el IPCC (2011) en su SRREN analiza las estimaciones sobre la instalación de renovables en varios escenarios, considerando que en la mayoría de los 164 casos analizados habrá un aumento significativo en el despliegue de la energía renovable en los horizontes de 2030 y 2050, tal y como se observa en la Figura 4. En este caso, más de la mitad de los escenarios asumen que las renovables representarán una producción de más del 17% de la energía primaria total en 2030, incrementándose a más del 27% en 2050. De hecho, los escenarios más optimistas elevan las figuras anteriores a un 43% en 2030 y un 77% en 2050.

Figura 4. Desarrollo temporal de las energías renovables a nivel global



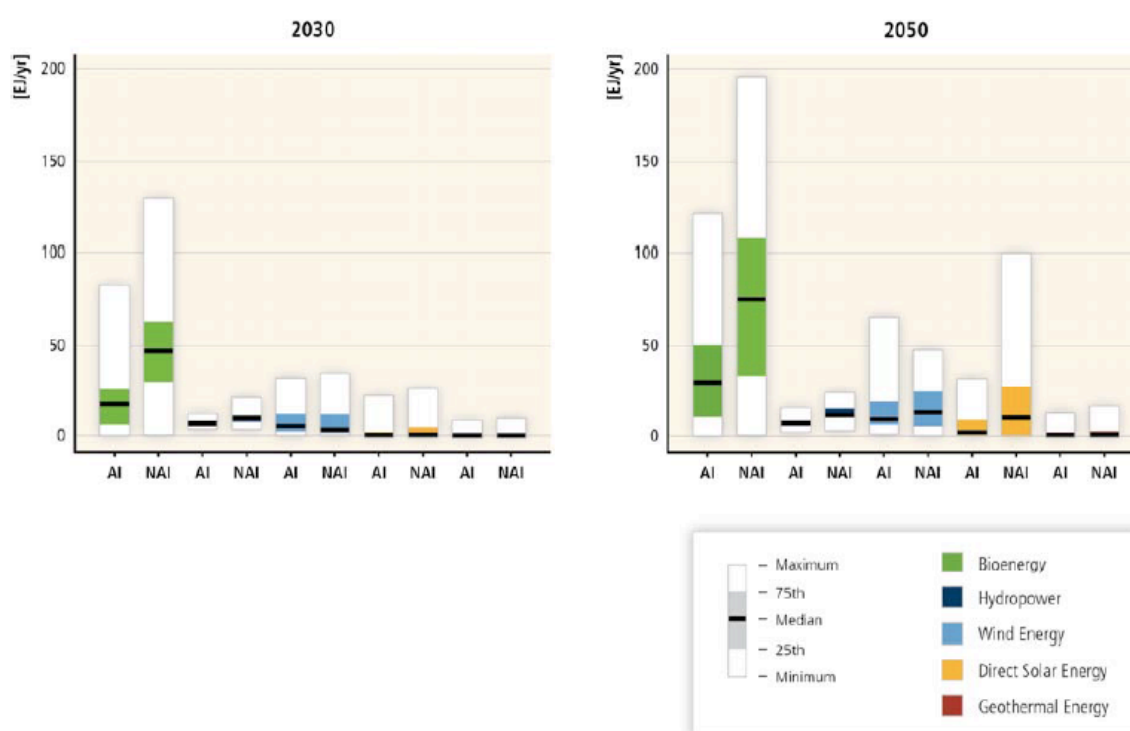
Nota: Suministro global de energía primaria renovable de 164 escenarios a largo plazo en comparación con las emisiones de CO₂ de origen fósil y de la industria en 2030 y 2050. Los paneles a la derecha de los diagramas de dispersión muestran los niveles de despliegue de la energía renovable en cada una de las categorías concentración de CO₂ atmosférico.

Fuente: IPCC (2011)

² La hoja de ruta europea a 2050 asume que las emisiones totales del sector eléctrico se reducirán prácticamente a cero, lo que implica que toda la capacidad no renovable será nuclear o estará equipada con tecnología CCS.

En general los escenarios del SRREN indican que el crecimiento de las energías renovables será generalizado en todo el mundo, aunque la distribución precisa del despliegue entre las regiones varía sustancialmente según las hipótesis adoptadas. Además, en la mayoría de los casos el despliegue total es mayor en el largo plazo en el grupo de los países no-Anexo I que en el grupo de los países del Anexo I de la Convención Marco de la ONU, tal y como muestra la Figura 5.³

Figura 5. Desarrollo temporal de las energías renovables por territorios



Nota: Suministro global de energía renovable primaria (equivalente directo) por fuente en el grupo de países Anexo I (AI) y el grupo de los no-Anexo I (NAI) en 164 escenarios a largo plazo para 2030 y 2050.
Fuente: IPCC (2011)

Es obvio que para adaptarse a un aumento tan importante del papel de las renovables, especialmente en el sector eléctrico, los sistemas energéticos deberán evolucionar considerablemente. A largo plazo los esfuerzos de integración podrían incluir la inversión en infraestructuras, modificación de marcos institucionales y planificación y capacidad de previsión del crecimiento de estas fuentes de energía. El desarrollo de los vehículos eléctricos, el aumento de la refrigeración y calefacción eléctrica, la flexibilidad en la demanda (contadores inteligentes), el almacenamiento de la energía, entre otros fenómenos, pueden asociarse a esta tendencia.

³ La IEA (2008) también concluye que el mayor potencial para instalar capacidad renovable adicional se encuentra en los BRICS (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica), EE.UU., la UE, y Canadá.

3.2. Incertidumbre de los escenarios

Tal y como indica el análisis anterior, existen diferencias en los resultados de los escenarios sobre la importancia que jugarán las energías renovables en la futura mitigación de las emisiones de GEI. Esto se debe a la existencia de varios factores de incertidumbre respecto a estas tecnologías, que reflejan los distintos escenarios a través de diversas asunciones y que por tanto explican la variedad de resultados finales.

En la sección precedente aclaramos que el papel de las renovables en la estrategia contra el cambio climático depende en buena medida en la disponibilidad de otras alternativas para reducir emisiones, sobre todo la eficiencia energética, la energía nuclear y el CCS. El WEO 2011, por ejemplo, dedica un capítulo entero a las consecuencias de que la captura y almacenamiento de carbono no se convierta en una tecnología viable, lo que implicaría que en 2035 las reducciones de emisiones conseguidas por las renovables tendrían que aumentar un 45% respecto al escenario 450 para poder cumplir con el objetivo de dos grados⁴. De hecho, Herold et al. (2010) son poco optimistas sobre la disponibilidad y viabilidad de las tecnologías CCS en el futuro.

También es posible que el cambio climático en sí afecte a la efectividad y eficiencia de las tecnologías renovables. Puesto que las fuentes renovables dependen en gran medida de las condiciones naturales en las que se desarrollan, se espera que el cambio climático tenga un impacto en el tamaño y distribución geográfica de su potencial productivo. El cambio climático puede influir así en la bioenergía (impacto sobre la producción de biomasa) y sobre la energía solar (por posibles variaciones y cambios en la distribución de la nubosidad). Para la energía hidroeléctrica se espera que los impactos sean ligeramente positivos al aumentar globalmente las precipitaciones, aunque puede haber importantes efectos negativos locales o regionales. Para la eólica tampoco se pronostica un gran impacto, aunque sí algunos cambios en la distribución de los recursos eólicos. Finalmente, en la geotérmica y marina no se prevén cambios significativos.

En resumen, hay bastante incertidumbre respecto al papel futuro de las energías renovables en los sistemas energéticos. En primer lugar, por la poca seguridad sobre el nivel de emisiones que será necesario alcanzar y sobre la efectividad de estas fuentes. También por las incertidumbres existentes respecto a otras alternativas de mitigación, como CCS y eficiencia energética: Generalmente hay menos consenso sobre la importancia del CCS y la energía nuclear en los escenarios, mientras que la eficiencia energética y las renovables siempre juegan un papel central (ver también Delarue et al., 2011 y Meeus et al., 2011). Por ello, las previsiones del IPCC para las energías renovables apuntadas con anterioridad y que señalan porcentajes entre el 17% (2030) y 27% (2050) de la producción primaria de energía desde estas fuentes deberían interpretarse como cifras mínimas. Esto nos lleva a dos asuntos: cuál es el potencial tecnológico

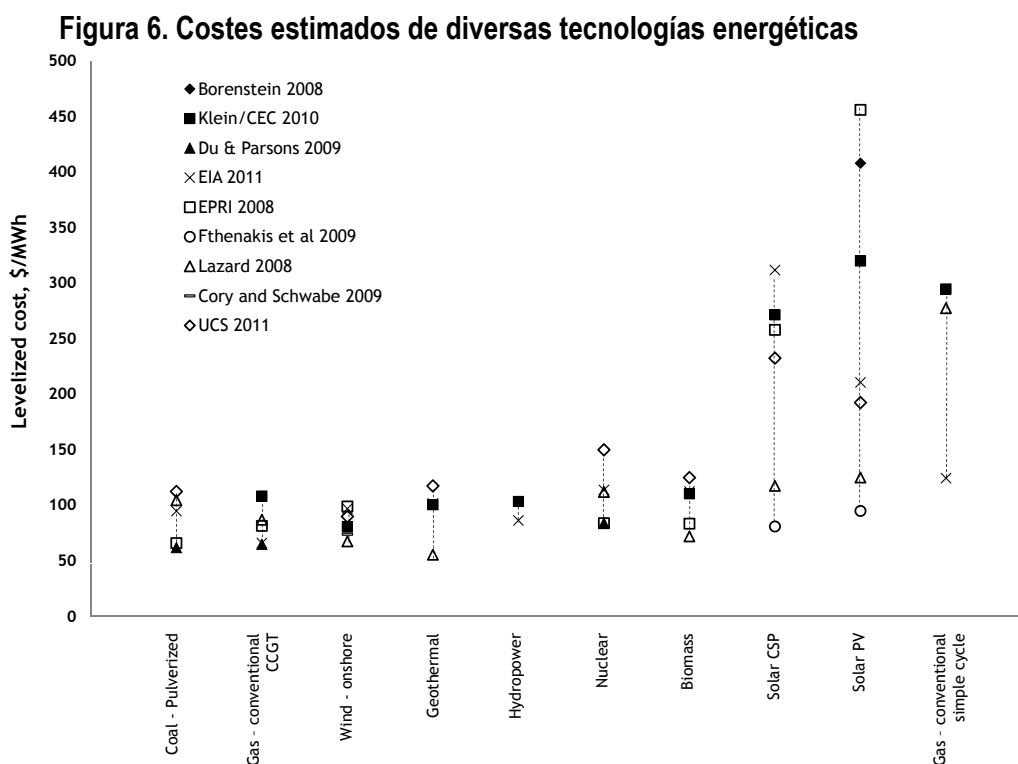
⁴ Ver también IPCC (2011) para una discusión sobre la influencia sobre el papel futuro de las energías renovables de la disponibilidad (o no) de CCS y nuclear.

de las distintas energías renovables (Sección 4) y qué políticas deben diseñarse para conseguir alcanzar cifras tan elevadas de producción (en términos absolutos y relativos) de energía renovable (Sección 5).

4. Potencial tecnológico de la energía renovable

Las reducciones de emisiones conseguidas en los escenarios señalados con anterioridad dependen crucialmente del avance tecnológico. Por ejemplo, la IEA (2010) en sus Perspectivas Tecnológicas de la Energía (ETP) estimó que las emisiones ocasionadas por un escenario tendencial (*business as usual*) para 2050 serían cuatro veces más altas que las correspondientes a un escenario que asuma un alto avance tecnológico para la reducción de GEI. Esto refleja lo importante que es mejorar la eficiencia y efectividad de las medidas actuales en la mitigación del cambio climático.

En particular, para las energías renovables se han hecho diversas estimaciones sobre el coste de producir un MWh con cada tecnología disponible. La Figura 6 utiliza la información suministrada por Borenstein (2011) para visualizar los rangos de costes para diferentes tipos de tecnologías energéticas (incluyendo nuclear, convencional fósil, CCS y renovables).



Fuente: Borenstein (2011)

En cualquier caso hay que resaltar que las estimaciones sobre los costes de las diferentes tecnologías energéticas son muy difíciles. Borenstein (2011) señala que esos costes dependen de diversas asunciones (precios energéticos, inflación), y que no se consideran características particulares en el funcionamiento de las distintas tecnologías. Por su parte, Delarue et al. (2011) concluyen que las demandas que generan las distintas tecnologías energéticas sobre la red eléctrica son muy diferentes, por lo que deberían contemplarse en los cálculos de costes⁵. También argumentan que el balance de costes fijos y costes variables es diferente entre las tecnologías, por lo que algunas tecnologías requieren más inversión inicial que las hace menos atractivas. Finalmente, Borenstein (2011) argumenta que es fundamental comparar los costes con la tecnología que se va a sustituir en la realidad antes de tomar la decisión de instalar capacidad renovable. Todas estas críticas reflejan las dificultades que existen para calcular correctamente los costes de las distintas tecnologías, aunque la comparación de costes es imprescindible para poder tomar decisiones adecuadas.

Tabla 2. Costes estimados de tecnologías bajas en carbono (2010-2050)

		Tasa de aprendizaje (%)		Reducción anual (%)	Reducción de costes (2010 = 100)		
					2020	2030	2050
Fósil	Carbón convencional			0,5		89-90	82-85
	Gas convencional			0,5		92-94	85-88
	Carbón con CCS	12				74-76	64-68
	Gas con CCS	12				66-75	60-69
	Carbón con CCS adaptado	12				48-55	40-49
	Gas con CCS adaptado	12				46-58	40-53
	Petróleo			0,5		93-95	80-82
	Nuclear	3 - 5				100	96-97
RE	Eólica terrestre	5			70-90	90-93	65-85
	Eólica marina	5			60-90	66-67	55-80
	Solar FV	15			50	41-52	
	Solar termoeléctrica		5 - 15			58-73	43-55
	Biomasa			1		69-74	56-62
	Geotérmica			1		72-75	66-67
	Hidráulica			0,5		90-98	83-87

Fuente Comisión Europea (2011)

Fuente IPCC (2011)

Notas: 1) Se considera tasa de aprendizaje la reducción (en %) de costes cada vez que se duplica la capacidad instalada de la tecnología. 2) La tasa de aprendizaje de carbón CCS y gas CCS solo se refiere a la parte del CCS. 3) El dato de la Solar FV para 2020 del IPCC (2011) supone un crecimiento anual del mercado en un 35%. 4) Los valores de costes para 2030 y 2050 de EC (2011) provienen de la hoja de ruta a 2050 a partir de suposiciones de penetración de cada tecnología. 5) Los resultados reportados por IPCC (2011) provienen de una revisión de la literatura existente.

Fuente: EC (2011) e IPCC (2011).

Todavía es más difícil prever los avances tecnológicos y los costes de las tecnologías en el futuro lejano, como ya indicamos con anterioridad, siendo de nuevo algo particularmente

⁵ Concretamente, la alta variabilidad de la energía eólica, muchas veces producida lejos de los consumidores, puede requerir inversiones adicionales en las líneas eléctricas.

interesante y necesario. La Tabla 2 recoge una estimación de los costes de tecnologías bajas en carbono para un intervalo temporal amplio (2020, 2030 y 2050), lo que permite avanzar algunos mensajes aunque sin olvidar las dificultades e incertidumbres antes mencionadas. Así, la Tabla 2 indica que dentro de las tecnologías renovables más utilizadas (eólica terrestre y marina y solar FV) en 2030 y gracias al avance tecnológico se produciría una reducción de los costes de entorno a un 20% para la eólica y de más de un 50% para la solar FV. Es obvio que estos resultados tendrán una gran influencia en el despliegue y protagonismo de estas tecnologías en los sistemas energéticos, de ahí la importancia de que los avances tecnológicos se materialicen.

Volviendo a los escenarios del WEO, en la Figura 3 se detallaban las producciones renovables adicionales en TWh para pasar del escenario de “políticas actuales” a “nuevas políticas”. La eólica tendría que asumir en torno a 2.000 TWh de la producción adicional y la solar PV 700 TWh. Basándose en los datos reportados por Borenstein (2011), los costes de generar estas cantidades serían de 407.000 millones de US\$⁶. De producir los 2.700 TWh de electricidad con carbón, la fuente que será sustituida por las renovables en los distintos escenarios (ver Tabla 1), costaría 243.000 millones de US\$. Esto significa un coste adicional de 164.000 millones de US\$ para cambiar de tecnologías energéticas basadas en carbón a la eólica y solar FV, cantidad que se reduciría considerablemente si se produce el avance tecnológico (20% eólica y 50% solar), convirtiéndose en un sobre coste (convencional, sin contemplar costes externos ambientales) de 101.500 millones de US\$⁷. En este caso los costes adicionales por cantidad de electricidad generada serían de 37,5 \$/MWh, tal y como resume la Tabla 3⁸.

Tabla 3. Impactos de reducciones de costes de las energías renovables

	Costes obtenidos de Borenstein 2011 (US\$/MWh)	Producción adicional hasta 2035 - escenario "políticas nuevas" del WEO 2011 (MWh)	Coste total de la producción con renovables (MUS\$)	Coste de producción alternativa fósil, carbón (MUS\$)	Coste adicional: renovables vs carbón (US\$)	Avance tecnológico (reducción de costes)	Coste adicional con avance tecnológico secuencial constante (MUS\$)	Coste adicional con avance tecnológico instantáneo (MUS\$)
Eólica (promedio terrestre y marina)	130,00	2.000.000.000	260.000		80.000	20%	54.000	28.000
Solar FV	210,00	700.000.000	147.000		84.000	50%	47.250	10.500
Referencia carbón	90,00			243.000		0%		
Total (MUS\$)			407.000	243.000	164.000		101.250	38.500
Total en US\$/MWh			150,74	90,00	60,74		37,50	14,26
Diferencia entre situación sin y con avance tecnológico (MUS\$):							62.750,00	125.500,00
Diferencia entre situación sin y con avance tecnológico (%):							-38,26%	-76,52%

Fuente: Elaboración propia a base de datos de EIA (2011), Borenstein (2011) e IPCC (2011).

De todo lo anterior podemos extraer que las previsiones actuales no descartan, de producirse el suficiente desarrollo tecnológico, que la descarbonización del sector energético pueda producirse

⁶ En Borenstein (2011) solo se reporta el coste de la eólica terrestre. Los escenarios prevén un creciente papel de la eólica marina, que actualmente se considera alrededor de un 50% más cara que la terrestre. Por ello tomamos como coste de la eólica un promedio de 130 US\$/MWh.

⁷ Con unas mejoras tecnológicas instantáneas del 20% para eólica y del 50% para la solar FV, estos costes adicionales se bajarían hasta los 38.500 millones de US\$ (un 76.5%).

⁸ En el ejemplo se asume que no hay avance tecnológico en la generación eléctrica con carbón.

sin costes adicionales. Por ello, incentivar el desarrollo y la investigación de las renovables puede provocar una importante reducción de costes para la descarbonización y afrontar con garantías el problema del cambio climático. Por ello, el sector público tiene gran interés en que al menos se realicen avances tecnológicos como los contemplados por EC (2011) e IPCC (2011). Como veremos más adelante, las políticas públicas de promoción de renovables serán fundamentales en este ámbito, concentrándose en aquellas tecnologías con más potencial de avance tecnológico y aplicabilidad. A su vez, tal y como argumenta Fouquet (2010), el apoyo público será crucial en este ámbito⁹. De hecho, los avances tecnológicos también pueden facilitar la consecución de acuerdos internacionales en el ámbito climático, al reducir los costes asociados a los compromisos de reducción de emisiones.

5. Políticas climáticas y políticas de promoción de renovables

Generalmente se distingue entre política climática y política de promoción de renovables. No obstante, aunque no se aplique directamente sobre las energías renovables, la política climática también afecta de lleno a este sector. Desde un punto de vista normativo, las políticas públicas en este ámbito han de solucionar varios fallos de mercado. En primer lugar se encuentra el problema de la externalidad climática asociada a las emisiones de GEI, ya discutido con anterioridad. Al tratarse de una externalidad global y de unas emisiones de naturaleza uniforme, hay un claro incentivo al comportamiento *free-rider* porque los efectos de las reducciones de emisiones en cualquier lugar benefician a todos. Por otro lado, las características dinámicas del problema hacen que gran parte de los daños sean percibidos en el futuro, por generaciones que todavía no existen. Existe un vínculo obvio de la política climática con las renovables, a través de la cuantificación de la externalidad y de su incorporación en aquellas tecnologías que emiten GEI para la producción energética¹⁰.

Un segundo fallo de mercado se refiere al desarrollo de nuevas tecnologías. Si las empresas subestiman los beneficios de las inversiones en I+D, o no se ven capaces de capturar todos sus beneficios, se produce un nivel menor de investigación y de avance tecnológico sobre el que sería beneficioso para la economía y la sociedad. Este segundo problema es la razón que justifica la existencia de una política, simultánea e independiente de la climática, de promoción de las energías renovables (Newell y Fisher, 2008).

Además de eso, el IPCC (2011) y la IEA (2008) identifican más barreras que afectan a las energías renovables, que deberían ser abordadas por las políticas públicas. En primer lugar, el

⁹ Fouquet (2010) aproxima a las futuras transiciones a los sistemas energéticos bajos en carbono desde la experiencia con las transiciones energéticas observadas desde el siglo XIX. Concluye que las transiciones de alcance llevan tiempo y se basan en la existencia de nichos de mercado que promueven la innovación y el cambio. En el caso climático, Fouquet sugiere que los nichos han de crearse y protegerse desde el apoyo del sector público, dada la inoperancia del libre mercado. De hecho, esto podría justificar también las políticas de promoción de tecnologías bajas en carbono a las nos referimos en las siguientes secciones.

¹⁰ Owen (2006) considera que las fuentes renovables pueden llegar a niveles competitivos frente a la alternativa fósil cuando se internalizan las externalidades.

IPCC apunta que habitualmente existe falta de información y concienciación sobre las energías renovables, incluso entre los decisores públicos. También hay una carencia de formación en el personal que maneja y gestiona las energías renovables y, finalmente, hay un problema de financiación en los mercados. Esto se agrava por la estructura de costes de muchas energías renovables, con una gran parte de costes fijos frente a los variables, por lo que es necesaria una inversión inicial relativamente alta.

Estos problemas han llevado a expertos del área a exigir que las políticas renovables sean *loud, long and legal*. El “loud” se refiere al impacto de la política, que debe ser significativo: es preciso que la política haga a las inversiones en energía no carbónica atractivas comercialmente. “Long” se refiere a la duración de las políticas, que deben ser de largo plazo, siendo fundamental que el periodo regulado por la política coincida con las características financieras del proyecto. Por último, “legal” requiere que los instrumentos políticos estén diseñados dentro de un esquema regulatorio claro y estable.

Para encontrar un buen equilibrio entre los factores anteriores, el IPCC (2011) resalta los componentes deseables de toda política pública de promoción de renovables. La política tiene que considerar en primer lugar todos los beneficios y costes sociales, incluyendo análisis de ciclo de vida, comparación con tecnologías convencionales, beneficios colaterales (ya mencionados con anterioridad), efectos sobre las redes, etc. En segundo lugar, ha de tratarse de una política clara y transparente para que los agentes involucrados puedan obtener la información de una manera entendible y rápida (minimización de costes de información). Además, la política debe considerar posibles efectos en otros ámbitos: agricultura, suministro de agua, planificación urbana, etc. Por su parte, la IEA (2008) subraya la necesidad de limitar las barreras administrativas, motivadas habitualmente por restricciones de planificación, falta de coordinación entre distintas autoridades, etc.¹¹

También parece evidente que la política ha de ser lo suficientemente flexible para ajustarse al desarrollo económico, la evolución de los mercados de renovables, la situación del mundo financiero (disponibilidad de capital) o a la base de recursos renovables locales. La flexibilidad, no obstante, puede llevar a choques con la deseable estabilidad a largo plazo, por lo que hay que buscar un equilibrio. Esto nos lleva al siguiente apartado, en el que discutimos aspectos concretos de las políticas de promoción de renovables y evaluamos algunas de las principales experiencias.

¹¹ De hecho, para la IEA solucionar estos problemas puede ser más importante que la elección de los sistemas de promoción renovable (cuotas, certificados verdes, etc.).

5.1 Aplicaciones concretas de la política de cambio climático y sus impactos en las energías renovables

> Un precio para el CO₂

Poner un precio a las emisiones de CO₂ no es literalmente una política renovable. Es una política climática. No obstante afecta a las renovables de una manera indirecta, porque hace que se vuelvan relativamente más baratas con respecto a las energías fósiles. Además, también da una señal a largo plazo para la transformación tecnológica (eficiencia dinámica). Por tanto, es un componente necesario para el desarrollo de las energías renovables. Este precio para el CO₂ puede introducirse como un impuesto, o mediante un mercado de emisiones.

Algunos economistas proponen como único sistema de promoción de renovables este precio para el CO₂. Sin embargo, y tal como se ha comentado, la existencia de la externalidad en el mercado de la innovación (Newell, 2010), otros fallos o barreras de mercado (Linares y Labandeira, 2010), o incluso el riesgo de fuga de emisiones¹² hace que, en la práctica, y a pesar de ser como hemos mencionado una condición necesaria, el precio para el CO₂ no sea una condición suficiente (Nordhaus, 2010). La presencia de la externalidad asociada a la innovación, y las dificultades socio-políticas para que los precios sobre las emisiones de GEI tengan el nivel necesario exigen el empleo de medidas complementarias (Newell y Fischer, 2008; Kemfert y Diekmann, 2009). Éstas pueden configurarse como sistemas públicos de promoción de tecnologías bajas en emisiones de GEI, que discutimos en la sección siguiente.

> Apoyo directo de las energías renovables

Generalmente se distinguen dos tipos de sistemas de apoyo para las renovables: el apoyo directo a la innovación (I+D o *technology-push*) o los incentivos para la implantación a gran escala (*deployment*, o *market-pull*). Ambos métodos contribuyen a reducir los costes de la energía renovable; la I+D de una manera directa y la implantación a gran escala por el *learning by doing*. El *learning by doing* incentiva el crecimiento de la industria, las economías de escala y los avances tecnológicos obtenidos por la experiencia de haber incrementado la producción e instalación.

Hay consenso en la literatura científica en que hace falta una buena mezcla de ambos tipos de promoción, innovación e implantación (IPCC, 2011; IEA, 2008; IEA, 2010; Newell y Fischer, 2008). No obstante, en términos de coste absoluto, se observa un menor apoyo relativo vía I+D y mucho más apoyo mediante *learning by doing* sobre todo en la UE. Muchos países de la UE

¹² La fuga de carbono se refiere al riesgo de relocalización de la actividad económica a zonas en las que no se aplican políticas reductoras de las emisiones de CO₂. La fuerte disparidad entre la evolución de las emisiones de CO₂ realizadas en el Reino Unido (-0,5%), donde existen desde hace años políticas de estas características, y las globales atribuibles al consumo (incluyendo importaciones) de los ciudadanos británicos entre 1990 y 2004 (+15%) indican la relevancia de este fenómeno (Druckman y Jackson, 2009).

optaron por una estrategia de implantación a gran escala, en parte debido a los objetivos marcados por la Comisión Europea. Así, los estados miembros han elegido entre sistemas de tarifas tipo *feed-in* (FIT) o certificados verdes para conseguir el objetivo de un 20% de la energía final consumida proveniente de renovables en 2020 (EC, 2010). No obstante Nemet y Baker (2009) encuentran que la I+D es la opción que ha dado mejores resultados para la maximización de los avances tecnológicos a largo plazo, al menos para la energía solar fotovoltaica en EEUU. Además, apoyar la I+D directamente puede reducir el fallo de mercado en la innovación que mencionamos anteriormente de una manera directa. La I+D realizada por las empresas sin apoyo público se dedica típicamente a proyectos menos arriesgados con más probabilidad de retorno a corto plazo. La financiación pública puede alinear los incentivos de las empresas con el largo plazo del desarrollo de las renovables como herramienta para mitigar el cambio climático (IEA, 2008).

Por tanto, puede concluirse que, en función de la tecnología, puede ser necesario cambiar el equilibrio entre los esfuerzos de innovación y de implantación a gran escala; en concreto hace falta más I+D para algunas tecnologías. La IEA (2010) estima la cantidad necesaria de inversión en I+D para su escenario mundial *blue map*, un escenario que supone una reducción de emisiones globales del 50% y concluye que la inversión en I+D necesaria para lograr esto sería por lo menos 2 a 5 veces mayor que la actual. En este sentido el fijarse mayoritariamente en medidas con impactos en el corto plazo (la implantación a gran escala) puede ser en cierta medida sub-óptimo para algunas tecnologías, en función de su estado de desarrollo. Aunque es posible que en esta decisión de la Unión Europea hayan influido otros argumentos además del cambio climático, como los beneficios auxiliares; por ejemplo, la UE espera que el alcanzar el objetivo del 20% de la energía final suponga hasta 600.000 puestos de trabajo en el sector renovable europeo (EC, 2010).

En todo caso, como hemos mencionado, el posible aumento en el nivel de I+D no debe ser generalizado. El mix correcto entre I+D e implantación a escala debe venir determinado por las características especiales de cada tecnología. Un estudio de Jamasb y Köhler (2007) indica que la I+D es relativamente más eficiente para las tecnologías menos maduras. Así, el aumento de la I+D debería dirigirse sobre todo a tecnologías menos avanzadas como la solar o la eólica marina, para irse reduciendo a medida que se acerca la comercialización competitiva de la tecnología en cuestión. A medida que se aproxima la fase comercial de la tecnología, es más probable que el sector privado pueda asumir la I+D, ya que es más probable recuperar la inversión, y por tanto la inversión pública es menos necesaria (IEA, 2008).

Por su parte, los sistemas basados en la implantación a gran escala deberían ser aplicados sobre todo a aquellas tecnologías ya más maduras, como la eólica terrestre o la hidráulica, por ejemplo. Así se induce el aprendizaje en las cadenas de producción e instalación, y economías de escala, que a su vez resultan en más reducciones de costes. Estas políticas de apoyo a la implantación masiva deben estar enfocadas a las barreras específicas de las distintas

tecnologías renovables.¹³ Además, Moselle (2011) resalta que el *learning by doing* tiene límites sectoriales y regionales, porque la experiencia ganada mediante la implantación masiva en un sector o una región no es siempre transferible a otros proyectos.¹⁴ A la hora de diseñar sistemas de apoyo hay que ser consciente de estos problemas específicos para poder mejorar la eficiencia de la política.

Como conclusión, es necesario un cambio en las políticas actuales en algunos países, que se centran demasiado en la implantación masiva sin haber recorrido previamente la curva de aprendizaje a través de I+D. Esto es especialmente relevante en el caso de las tecnologías con más recorrido de mejora por esta vía. El diseñar una mezcla correcta entre el apoyo mediante I+D y vía implantación masiva, para cada tipo de tecnología renovable, en función de su grado de madurez, puede maximizar la reducción de costes a largo plazo y mejorar la eficiencia de las políticas de promoción de renovables.

6. Conclusiones

Más allá de problemas coyunturales como los experimentados durante la crisis actual, las energías renovables tienen un papel fundamental que jugar en la lucha contra el cambio climático. Todos los escenarios prospectivos futuros muestran cómo, para alcanzar los niveles deseables de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, es imprescindible descarbonizar casi totalmente el sector eléctrico y abandonar en gran parte el uso de los combustibles fósiles en el resto de los sectores. Si bien la alternativa más deseable para ello es la eficiencia energética, esta tiene un límite, y a partir de él deben ser las energías renovables las que permitan alcanzar la reducción buscada.

A esto contribuyen varios factores: en primer lugar, la urgencia de la actuación contra el cambio climático, junto con las numerosas barreras existentes para el ahorro energético, hacen que la apuesta por las renovables deba ser incluso más fuerte que lo que teóricamente parecería; las energías renovables también presentan beneficios adicionales a la mera reducción de emisiones (desarrollo de una nueva actividad industrial, fundamentalmente); otro elemento a considerar es la externalidad existente en el mercado de la innovación, que reduce el incentivo a la mejora tecnológica, por otra parte imprescindible para reducir las emisiones a un coste asequible en el largo plazo. Por todo ello, es necesario desarrollar políticas específicas de apoyo a las energías renovables. Además, estas políticas, al abaratar el coste de estas tecnologías, pueden hacer compatible la reducción de emisiones con el mantenimiento del desarrollo económico y del estilo de vida actual.

¹³ Estas barreras son de tipo regulatorio, integración en red y transmisión para la solar; coste-eficiencia y sostenibilidad para la geotérmica; impactos sociales y ambientales, presión sobre el recurso hídrico para la hidráulica; institucionales, integración en red, transmisión y aceptación pública para la energía eólica.

¹⁴ Por ejemplo, la experiencia y mejora de procesos conseguidas por haber instalado capacidad eólica marina en Escocia no es necesariamente transferible a un proyecto en Francia que tiene una geología y un clima distinto.

Ahora bien, es necesario diseñar cuidadosamente estas políticas de forma que sean efectivas, pero también coste-eficientes. En particular, es imprescindible tener en cuenta el potencial de mejora tecnológica de las distintas opciones renovables, y también mantener un balance adecuado entre las políticas de apoyo a la I+D y las que incentivan la implantación a gran escala. Así, las tecnologías menos maduras deberán apoyarse prioritariamente mediante la I+D, mientras que las que alcancen la fase comercial deberán hacerlo mediante políticas de implantación masiva, como las primas o las subastas de potencia. Por otra parte, y referido a esta segunda fase, las tecnologías con más potencial de reducción de coste, como la solar fotovoltaica, deberían apoyarse mediante instrumentos de cantidad de forma que el coste del apoyo no sea excesivo. En cualquier caso, el objetivo último de cualquier política de promoción debe ser autodestruirse, es decir, que no sea necesaria debido a que la tecnología en cuestión ya sea competitiva.

Por último, no hay que olvidar que la motivación principal de estas políticas de apoyo a las renovables es la lucha contra el cambio climático. Por tanto, nunca pueden estar desconectadas de las políticas climáticas, ni sustituirlas. Es fundamental contar con un precio del CO₂ que mantenga el incentivo a largo plazo a la mejora tecnológica, y sin el cual las políticas tecnológicas no tienen sentido.

Referencias bibliográficas

Borenstein, S. (2011) The private and public economics of renewable electricity generation WP 221, Energy Institute at Haas.

Comisión Europea (2010) Europe 2020. A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Bruselas.

Delarue, E., Meeus, L., Belmans, R., D'haeseleer, W., Glachant, J.M. (2011) Decarbonizing the European electric power sector by 2050: A tale of three studies. WP RSCAS, EUI 2011/03.

Druckman, A., Jackson, T. (2009) The carbon footprint of UK households 1990-2004: A socio-economically disaggregated, quasi-multiregional input-output model. *Ecological Economics* 68, p. 2066-2077.

EC (2011) A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, EU Commission (DG Climate), Brussels.

Economics for Energy (2011) Informe sobre Potencial Económico de Reducción de la Demanda de Energía en España, disponible en: <http://www.eforenergy.org/actividades/Presentacion-del-Informe-sobre-Potencial-Economico-de-Reduccion-de-la-Demanda-de-Energia-en-Espana.php>.

Fouquet, R. (2010) The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy* 38, p. 6586-6596.

Herold, J., Von Hirschhausen, C. (2010) Carbon capture, transport and storage in Europe: A problematic energy bridge to nowhere? *Nota di Lavoro* 156, FEEM.

IEA (2008) Deploying Renewables: Principles for Effective Policies, Agencia Internacional de la Energía, París.

IEA (2010) Energy Technology Perspectives. Agencia Internacional de la Energía, París.

IEA (2011) World Energy Outlook. Agencia Internacional de la Energía, París.

IPCC (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report especial del Grupo Intergubernamental de Cambio Climático, Ginebra.

IPCC (2011) Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Informe especial del Grupo Intergubernamental de Cambio Climático, Ginebra.

IPTS (2009) Economic Assessment of Post-2012 Global Climate Policies. Institute for Prospective and Technological Analysis. Bruselas.

Jamasb, T., Köhler, J. (2007) Learning curves for energy technology: a critical assessment, in: Grubb, M., Jamasb, T., Pollitt, M.G. (2008), *Delivering a Low Carbon Electricity System: Technologies, Economics, and Policy*. Cambridge University Press, Cambridge.

Kemfert, C., Diekmann, J (2009) Emissions Trading and Promotion of Renewable Energy-We Need Both, German Institute for Economic Research, Weekly Report No. 14/2009 (5).

Linares, P., Labandeira, X. (2010) Energy efficiency. Economics and policy. *Journal of Economic Surveys* 24, p. 573-592.

Meeus, L., Azevedo, I., Marcantonini, C., Glachant, J.M., Hafner, M. (2011) EU 2050 low-carbon energy future: Visions and strategies. WP RSCAS 2011/11, EUI.

Moselle, B. (2011) Climate Change Policy. Time for Plan B. Policy Exchange, Londres.

Nemet, F. G., Baker, E. (2009) Demand Subsidies Versus R&D: Comparing the Uncertain Impacts of Policy on a Pre-commercial Low-carbon Energy Technology, *Energy Journal* 30(4), p. 49-80.

Newell, R.G. (2010) The role of markets and policies in delivering innovation for climate change mitigation. *Oxford Review of Economic Policy* 26, p. 253-269.

Newell, R.G., Fischer, C. (2008) Environmental and technology policies for climate mitigation, *Journal of Environmental Economics and Management* 55, p. 142–162.

Nordhaus, W. (2010) Designing a friendly space for technological change to slow global warming. *Energy Economics* 33, p. 665-673.

Olmstead, S.M, Stavins, R.N. (2010) Three key elements of post-2012 international climate policy architecture. *Nota di Lavoro* 97, FEEM.

Owen, A.D. (2006) Renewable energy: Externality costs as market barriers, *Energy Policy* 34(5), p. 632-642.

Prins, G., Galiana, I., Green, C., Grundmann, R., Korhola, A., Laird, F., Nordhaus, T., Pielke, R., Rayner, S., Sarewitz, D., Shellenberger, M., Stehr, N., Tezuko, H. (2010) A new direction for climate policy after the crash of 2009 (Hartwell Paper). Institute for Science, Innovation and Society, Oxford.

Tirole, J. (2009) Some economics of global warming. *Rivista di Politica Economica*, 11/12, p. 9-41.