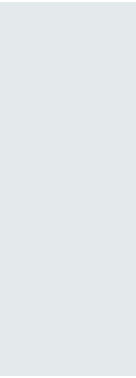


economics for energy



Sistema Energético y Cambio Climático: Prospectiva Tecnológica y Regulatoria

Xavier Labandeira
Universidade de Vigo y Economics for Energy

Resumen

Este documento tiene como objetivo avanzar los principales rasgos de largo plazo que pueden conformar los futuros acuerdos y políticas climáticas en el ámbito energético global. Puesto que energía y cambio climático son dos caras de la misma moneda, los efectos de las estrategias correctoras en este ámbito serán potencialmente de gran alcance, especialmente en horizontes temporales alejados. Aunque el informe parte de las dificultades para alcanzar acuerdos internacionales que eviten los fenómenos de cambio climático, asume la introducción de medidas que garanticen que la temperatura media no traspase el umbral de aumento de 2°C. Éstas han de llevar, obligatoriamente, a una fuerte descarbonización del sector energético que solo será posible con un radical cambio tecnológico. El trabajo recoge así los resultados de diversos análisis prospectivos sobre el *mix* tecnológico para un sistema energético altamente descarbonizado a mediados de siglo. Seguidamente se presentan algunas características de las políticas públicas que han de acompañar este proceso y se avanzan algunos posibles desarrollos a largo plazo en este ámbito, en ambos casos prestando una especial atención al papel de las administraciones subcentrales.

Contenidos

1. Introducción
2. Aspectos básicos del cambio climático y su corrección
3. Horizontes tecnológicos energéticos
4. Políticas públicas prospectivas
5. Conclusiones
6. Fuentes bibliográficas

Este documento ha sido elaborado a petición de la Lehendakaritza (Gobierno Vasco), dentro de los trabajos realizados durante 2011 por el grupo de expertos en energía. Agradezco los comentarios y sugerencias de los participantes en dicho grupo, especialmente de Antxon Olabe, si bien los contenidos y opiniones expresadas en el trabajo son de mi única responsabilidad.

1. Introducción

Este informe ha sido elaborado para la Lehendakaritza del Gobierno Vasco, como contribución al grupo de trabajo sobre energía creado en 2011 para orientar la política energética vasca a largo plazo. El documento pretende, por tanto, avanzar los principales rasgos prospectivos que pueden conformar los futuros acuerdos y políticas climáticas en el ámbito energético global. Aunque el informe parte de las dificultades para alcanzar acuerdos internacionales que eviten los fenómenos de cambio climático, asume la introducción de medidas que garanticen que la temperatura media no traspase el umbral de aumento de 2°C. Puesto que energía y cambio climático son dos caras de la misma moneda, los efectos de las estrategias correctoras en este ámbito serán potencialmente de gran alcance. De hecho, en el largo plazo habrá de producirse una fuerte descarbonización del sector energético que solo será posible con un radical cambio tecnológico. Pero para ello serán necesarias políticas estables e intensas que favorezcan este proceso y que sean viables desde una perspectiva socio-económica y aplicables administrativa y políticamente en la práctica.

El trabajo comienza así con una descripción del problema del cambio climático, resumiendo los grandes desafíos que plantea para las sociedades contemporáneas y las dificultades para su solución. En particular, se discuten las propiedades que deberían cumplir los futuros acuerdos internacionales en este ámbito, partiendo de los problemas actuales para definir una solución que dé continuidad al Protocolo de Kioto. En cualquier caso, se emplea lo acordado en la cumbre de Cancún en relación al aumento máximo de las temperaturas medias para definir un escenario de fuertes reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hacia mediados de siglo. En el mundo desarrollado esto llevará a la práctica descarbonización (por reducción del principal GEI, dióxido de carbono o CO₂) de su sistema energético, y a una elevada reducción de las emisiones de GEI en los países emergentes y en vías de desarrollo.

En la siguiente sección del trabajo se recogen así los resultados de diversos análisis prospectivos sobre el *mix* tecnológico para un sistema energético global altamente descarbonizado en el largo plazo. Por supuesto, este fuerte cambio ha de estar pilotado por políticas intensas y estables que marquen nuevas tendencias. Por ello, el cuarto apartado presenta un análisis prospectivo de las políticas climáticas futuras, poniendo una especial atención al papel de las administraciones subcentrales y en los condicionantes socio-económicos para su definición y aplicación.

El informe se cierra con los correspondientes apartados de conclusiones y referencias bibliográficas. Con respecto a estas últimas, me he centrado en las simulaciones globales más representativas y en trabajos recientes, fruto de una selección personal y no exhaustiva, que cubren parte de las abundantes cuestiones que surgen de un tema tan amplio y complejo.

2. Aspectos básicos del cambio climático y su corrección

El cambio climático se ha configurado como uno de los principales desafíos para las sociedades contemporáneas. Un alto consenso científico sobre sus causas y efectos, reflejado en los informes del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático de la ONU (IPCC) desde comienzos de los noventa, y unas consecuencias socio-económicas y global de gran magnitud parecían garantizar un acuerdo internacional para limitar su principal precursor: las emisiones asociadas a las actividades humanas de GEI.

Para un economista el cambio climático es quizá el ejemplo más representativo y brutal de una externalidad negativa. Tanto porque refleja un fallo institucional del mercado, que no contempla los costes de las emisiones de GEI en sus intercambios, como por sus fuertes efectos globales y su naturaleza intertemporal. 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, pero la confluencia de tamaño y efectos de largo plazo con un alcance global del problema 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.

Es por ello que la ciencia económica ha intentado identificar las sendas y soluciones que podrían facilitar la consecución de acuerdos para afrontar un problema de estas características. En este informe voy a seguir mayoritariamente razonamientos económicos, aunque probablemente sea conveniente comenzar relativizando las capacidades de nuestros conceptos y herramientas. Así, en un ensayo provocador, Prins et al. (2009) avanzan una serie de hipótesis para explicar el fracaso de la negociación climática internacional y que poco tienen que ver con el contexto precedente. En primer lugar dudan de que la noción económica de externalidad negativa ambiental sea útil para definir y hacer frente a un problema de estas características. Son tantas las vertientes no ambientales del cambio climático que creen que una actitud simplista que identifique este problema como meramente ambiental está abocada al fracaso. De hecho, aducen que buena parte de las dificultades para encontrar soluciones se encuentran en la sensación social de 'irresolubilidad' del problema: como en el caso de la pobreza mundial o de la cura del cáncer (lo que podría explicar la oscilante percepción social sobre este asunto en muchas sociedades durante los últimos años). En segundo lugar, indican que el supuesto básico de liderazgo científico de solución al problema es también de dudosa aplicación porque una parte de la sociedad se ve influida por factores/creencias ajenos a la ciencia en este caso (especialmente cuando las regulaciones climáticas pueden interpretarse como un ataque a su estilo de vida).

En cualquier caso, durante los últimos años han sido numerosas las aportaciones que desde la economía se han ocupado de caracterizar y ofrecer soluciones a los fenómenos de cambio climático. En un informe de estas características sería imposible ofrecer un resumen exhaustivo

de la literatura económica sobre estos asuntos, por lo que me voy a referir a dos trabajos recientes que, bajo mi punto de vista, recogen las cuestiones clave de este debate (Tirole, 2009; Olmstead y Stavins, 2010). En ambos artículos se parte de las disfunciones de la negociación y políticas climáticas desarrolladas desde la década de los noventa, en un marco 'arriba-abajo' a la *Kioto* dentro del sistema ONU: número limitado de países con compromisos de mitigación de GEI, ausencia de mecanismos que garanticen el cumplimiento de los compromisos, marco temporal limitado para conseguir reducciones y limitadas medidas coste-efectivas.

Como respuesta a este diagnóstico, los autores antes citados proponen un sistema en el que se establezcan objetivos claros, estrictos y flexibles de largo plazo pero moderados y firmes en el corto plazo, que se extiendan a la mayor parte de las economías del planeta y que tengan en cuenta aspectos distributivos entre países. Los objetivos, además, deberían ser comprobables y con un conjunto de mecanismos que garantizaran su cumplimiento por parte de los participantes. En particular, Tirole (2009) sugiere vincular un acuerdo climático de estas características al cómputo de deudas soberanas o a los tratados de comercio internacional. Finalmente, deberían promoverse actuaciones 'abajo-arriba', o basadas en el principio de subsidiariedad, que garantizaran la consecución de los objetivos a mínimo coste. En este sentido, sería recomendable que existiese un precio único y global por las emisiones de GEI que contribuyese a que las actuaciones basadas en la subsidiariedad, nacionales y sub-nacionales, fuesen coste-efectivas.

Este es el contexto en que se mueve el informe. Partiré de un acuerdo estricto a largo plazo (que la temperatura no aumente más de 2°C en la segunda mitad del siglo, tal y como fue acordado en la cumbre de Cancún), pero que permita modificar los objetivos de mitigación en caso de cambios en la evolución económica, de emisiones, etc. Un acuerdo, además, en el que los precios de las emisiones de GEI jueguen un papel fundamental, aunque no único. En una interesante investigación, Fouquet (2010) se 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 que me referiré en las siguientes secciones.

Un objetivo climático tan ambicioso como el establecido en Cancún ha de llevar a una alta descarbonización del sistema energético hacia mediados de este siglo, prácticamente total en las economías avanzadas. Ese será el supuesto que adoptaré a lo largo de este informe y que, como se observará en el siguiente apartado, ha de llevar a un fuerte cambio tecnológico en los próximos decenios. Cambio tecnológico que ha de ser pilotado, como se apuntó con anterioridad y se evidenciará en las siguientes secciones del informe, por la promoción pública de tecnologías con bajas o nulas emisiones de GEI.

Dadas las fuertes inercias existentes en los sistemas energéticos y las dificultades observadas en la obtención de acuerdos climáticos internacionales, un cambio tan radical puede ser excesivamente optimista. Sin embargo, hay razones extra-climáticas que pueden contribuir a un cambio de gran alcance, como el considerado en este informe, en las tecnologías basadas en la combustión fósil: una mayor seguridad energética y la reducción de externalidades ambientales asociadas a la contaminación atmosférica local y regional (especialmente importantes en las economías emergentes).

Quizá sea necesario, no obstante, avanzar otros posibles cursos de las políticas contra el cambio climático y que podrían influir sobremanera en los futuros sistemas energéticos (no solo porque no se produciría el cambio tecnológico tan radical que avanza la prospectiva energética recogida en este informe sino también por sus efectos directos sobre el sector). En un trabajo reciente, Moselle (2010) se refiere a un plan B para la política climática europea y recomienda poner énfasis en soluciones basadas en la adaptación al cambio climático y en el desarrollo de tecnologías *backstop* o de último recurso (por ejemplo, geo-ingeniería) que puedan ponerse en funcionamiento si los efectos del cambio climático son superiores a los previstos o/y si la mitigación de las emisiones de GEI es claramente insuficiente.

En cualquier caso, en este informe me referiré fundamentalmente a la mitigación de GEI como factor fundamental de cambio en los sistemas energéticos contemporáneos. Y me centraré en los efectos tecnológicos de largo plazo. Aunque la adaptación también puede tener importancia en términos energéticos, solo me referiré a ella colateralmente en las perspectivas regulatorias. Respecto a la geo-ingeniería y otras opciones *backstop*, sus múltiples problemas e incertidumbres asociadas recomiendan su mención pero no tratamiento en este informe. En cualquier caso, los efectos de estas alternativas sobre los sistemas energéticos serían más limitados que los producidos por una mitigación a gran escala.

3. Horizonte tecnológico

3.1. El contexto

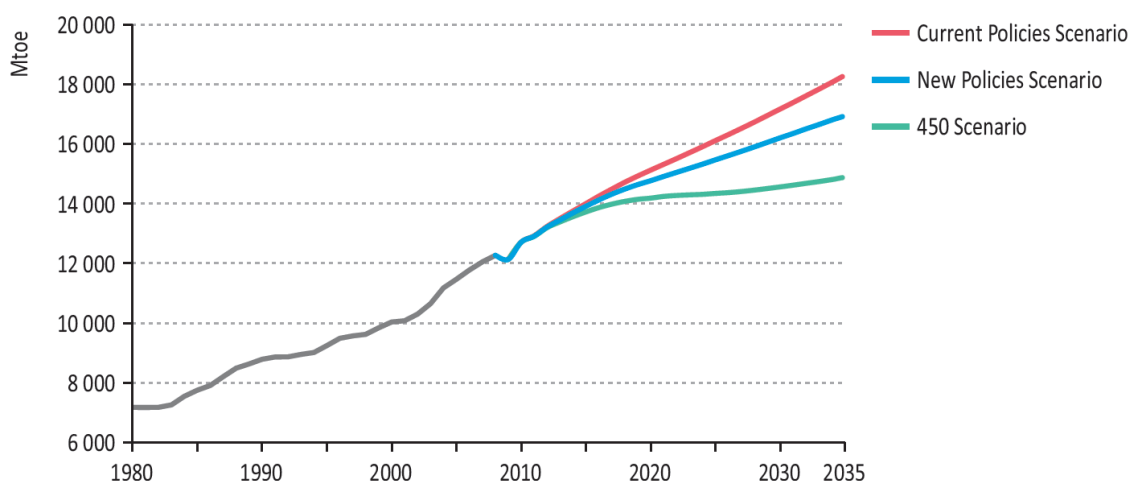
He apuntado cómo el mundo de la energía se enfrenta al reto de evitar la senda del aumento del consumo de energía actual basado en combustibles fósiles, tanto por sus efectos en términos de cambio climático y de otros problemas ambientales como por su contribución a la inseguridad energética. Un futuro sostenible implica reforzar el ahorro energético y apoyar las tecnologías energéticas con bajas o nulas emisiones de CO₂. En esta sección utilizaré 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) o el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). A partir de ellos observaré las implicaciones para las fuentes energéticas tradicionales, para las energías renovables y para las perspectivas tecnológicas en este ámbito. Cerraré el apartado con un resumen de las principales conclusiones de dichos estudios, mencionando también otros trabajos prospectivos llevados a cabo por instituciones privadas.

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 la conferencia de las partes de la convención marco de la ONU, celebrada en Cancún en diciembre de 2010. En Cancún se acordó limitar la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) a 450 ppm (partes por millón) para restringir el incremento de la temperatura del planeta a 2°C. Esto, como se verá a continuación, tendrá importantes efectos sobre la configuración del sistema energético global y europeo.

3.2. Escenarios energéticos

La IEA (2011), en su World Energy Outlook (WEO), presenta un escenario en el que no se sobrepasarían las concentraciones de GEI que garantizarían el aumento de la temperatura por debajo de los 2°C, el denominado *Escenario 450*. Este escenario se compara con el escenario denominado *Nuevas Políticas*, compuesto a partir de las propuestas de reducción de emisiones presentadas en la reunión de Copenhague de 2009 (y posteriormente recogidos en Cancún), y con el *Escenario Actual*, en el que no se contemplan cambios en la evolución actual (*business as usual*). En la Figura 1 se muestran las diferencias entre las demandas de energía primaria de cada escenario hasta 2035. La Tabla 1 recoge las principales asunciones que determinan los escenarios de *Nuevas Políticas* y *450*. En el primer caso, los límites de emisiones acordados en Copenhague y la dotación de un fondo para posibilitar la adaptación y mitigación en los países en desarrollo.

Figura 1. Demanda de energía primaria por escenario del WEO



Fuente: IEA (2011)

Tabla 1. Asunciones para escenarios y región (2020) por el WEO

	Escenario tendencial (BAU)	Escenario de Nuevas Políticas	Escenario 450
OCDE			Introducción de forma escalonada de precios del CO ₂ en todos los países; 100 mil millones anuales de financiación a los países de fuera de la OCDE en 2020; En el transporte de viajeros por vehículos ligeros; emisiones medias de 65 g/km en 2035.
Estados Unidos	Nuevos estándares; a nivel estatal, programas de apoyo a las energías renovables; mejora de las normas CAFE; créditos fiscales para las fuentes de energía renovables.	Precio "en la sombra" del carbono a partir de 2015, afectando a las decisiones de inversión en el sector de generación eléctrica; nuevos estándares para vehículos pesados de 2014 a 2018; regulaciones de la EPA sobre el mercurio y otros contaminantes en el sector de la energía.	17% de reducción de los gases de efecto invernadero en comparación con 2005 para 2020; fijación de precios de CO ₂ a partir de 2020.
Japón	Perspectiva a largo plazo en la oferta y la demanda (2009), incluyendo las reformas en la fabricación de acero, el apoyo a las energías renovables, en generación eléctrica y la mejora de la eficiencia en vehículos.	Implementación del "Plan Energético Básico" (en revisión por el terremoto sufrido este año); precio "en la sombra" del carbono a partir de 2015, afectando a las decisiones de inversión en el sector de generación eléctrica.	25% de reducción de los gases de efecto invernadero en comparación con 2005 para 2020; fijación de precios de CO ₂ implementados a partir de 2020.
Unión Europea	Sistema de comercio de emisiones (SCE) para generación, industria y (para 2012) aviación; Directiva de Eficiencia energética en los edificios; estándares de emisiones para los vehículos ligeros de pasajeros. 20% de reducción de emisiones en comparación con 1990 para 2020; hasta un 20% de participación de las renovables en la demanda de energía en 2020.	SCE para generación, industria y (para 2012) aviación; nuevos estándares para vehículos industriales ligeros; estándares más estrictos para vehículos privados ligeros.	30% de reducción de los gases de efecto invernadero en comparación con 2005 para 2020; SCE reforzado en la línea del roadmap para 2050.
Australia, Nueva Zelanda	Nueva Zelanda: SCE propio en 2010.	Australia: 5% de reducción en emisiones en comparación con el año 2000 para 2020; impuesto sobre el carbono para mediados de 2012 y mercado de emisiones propio desde 2015. Nueva Zelanda: Reducción de un 10% en comparación con 1990 para 2020.	Australia: Reducción del 25% de las emisiones en comparación con el año 2000 para el año 2020, Nueva Zelanda: Reducción del 20% de las emisiones con respecto a 1990 en 2020.

Corea		Reducción del 30% de las emisiones en comparación con las del BAU para 2020; fijación de precios de CO ₂ a partir de 2015.	Reducción del 30% de las emisiones en comparación con las del BAU para 2020; fijación de precios más altos de CO ₂ .
No-OECD	Se eliminan las subvenciones a los combustibles fósiles en aquellos países que ya cuentan con políticas.	Las subvenciones a los combustibles fósiles son eliminadas progresivamente en todas las regiones importantes para 2020 y existen políticas específicas en la regiones exportadoras.	Recepción de financiación para apoyar las acciones nacionales de mitigación; media de emisiones de los vehículos ligeros de transporte de pasajeros de 100 g/Km en 2035. Acuerdos sectoriales internacionales para el hierro y el acero y el cemento. Eliminación de subsidios a los combustibles fósiles por parte de los países importadores para 2020 y para las regiones exportadoras en 2035.
China	Aplicación de medidas en el 12 Plan Quinquenal, incluyendo 17% de reducción en la intensidad de CO ₂ para el año 2015, aumento de 5 GW de solar en 2015, aumento de 70 GW de potencia eólica en 2015 y comenzar la construcción de 120 GW de energía hidroeléctrica para el año 2015.	Reducción del 40% en la intensidad de carbono en comparación con el año 2005 para el año 2020, fijación de precios de CO ₂ a partir de 2020; cuota del 15% de energía no fósil en el suministro total de energía para el año 2020; de 70 a 80 GW de energía nuclear para el año 2020, 12 Plan Quinquenal superado; mayores objetivos de combustibles en vehículos ligeros para el año 2015.	Reducción del 45% en la intensidad de carbono en comparación con el año 2005 para el año 2020; precios más altos de CO ₂ ; mayor apoyo a las energías renovables.
India	Comercio de certificados de energía renovable; medidas nacionales para en cuanto a la solar y la eficiencia energética (PAT).	Reducción del 20% en la intensidad de CO ₂ en comparación con el año 2005 para el año 2020; propuesta estándares de combustibles eficientes en automoción; capacidad de producción de energía solar de 20 GW para el año 2022.	Reducción del 25% en la intensidad de CO ₂ en comparación con el año 2005 para el año 2020; ampliación de las tarifas preferentes para las energías renovables.
Brasil	Incentivos a la energía solar; objetivos de etanol en el transporte por carretera (20% a 25%).	Reducción del 36% de las emisiones en comparación con el BAU en 2020; aumento de la generación de electricidad a través de fuentes renovables.	Reducción del 39% de las emisiones en comparación con BAU en 2020, aumento en la generación a partir de fuentes renovables; fijación de precios de CO ₂ a partir de 2020.
Rusia	Aumento gradual del precio del gas y la electricidad (1% al año) en el sector residencial y del gas en industria (1,5%); aplicación de legislación sobre eficiencia energética de 2009.	Incremento del precio del gas y la electricidad del 2% anual en el sector residencial, en la industria precios del gas al nivel del de las exportaciones (menos impuestos y transporte) en 2020; aplicación de las medidas incluidas en el programa estatal de 2010 de eficiencia energética.	Liberalización más rápida de gas residencial y de los precios de la electricidad; fijación de precios de CO ₂ a partir de 2020; plena aplicación de las medidas incluidas en el programa estatal de 2010 de eficiencia energética; mayor apoyo a la energía nuclear y a las energías renovables.

Fuente: IEA (2011)

En el análisis realizado por el WEO de 2011 se concluye que una retirada de los subsidios al consumo de combustibles fósiles podría representar una enorme contribución al logro de las metas ambientales y de seguridad energética. Además, se prevé que los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) sigan siendo las fuentes predominantes de energía en 2035 en los tres escenarios. Obviamente, es en el escenario más limpio donde la participación de los combustibles fósiles es menor, beneficiando a las energías renovables y a la nuclear, tal y como se muestra en la Tabla 3.

En particular, de aplicarse las medidas anunciadas tras Copenhague y Cancún, la demanda de energía primaria seguiría aumentando un 38% entre 2009 y 2035. De este aumento, el 90% vendría de países de fuera de la OCDE, destacando la demanda de China (en 2035 consumirá un 70% más de energía que Estados Unidos). Ya en 2009, según datos de la propia IEA, China superó a Estados Unidos como mayor consumidor de energía del mundo. Por ello, el escenario

de *Nuevas Políticas* no sería suficiente para cumplir el objetivo climático establecido en la cumbre de Cancún.

Tabla 3. Demanda energética primaria por combustible y escenario (MToe)

	1980	2009	Escenario de Nuevas Políticas		Escenario de Políticas Actuales		Escenario 450	
			2020	2035	2020	2035	2020	2035
Carbón	1792	3294	4083	4101	4416	5419	3716	2316
Petróleo	3097	3987	4384	4645	4482	4992	4182	3671
Gas	1234	2539	3214	3928	3247	4206	3030	3208
Nuclear	186	703	929	1212	908	1054	973	1664
Hidráulica	148	280	377	475	366	442	391	520
Biomasa y residuos	749	1230	1495	1911	1449	1707	1554	2329
Otras renovables	12	99	287	690	256	481	339	1161
Total	7219	12271	14769	16961	15124	18302	14185	14870

Fuente: IEA (2011)

Tabla 4. Precios de CO₂ por región y escenario (US\$ por tonelada)

	Región	Sectores	2020	2030	2035
Políticas Actuales	Unión Europea	Generación, industria y aviación	30	40	45
Nuevas Políticas	Unión Europea	Generación, industria y aviación	30	40	45
	Corea	Generación e industria	18	36	45
	Australia, Nueva Zelanda	Todo	30	40	45
	China	Todo	10	23	30
450	Estados Unidos, Canadá	Generación e industria	29	87	120
	Unión Europea	Generación, industria y aviación	45	95	120
	Japón, Corea, Australia, Nueva Zelanda	Generación e industria	35	90	120
	China, Rusia, Brasil, Sudáfrica	Generación e industria	10	65	95

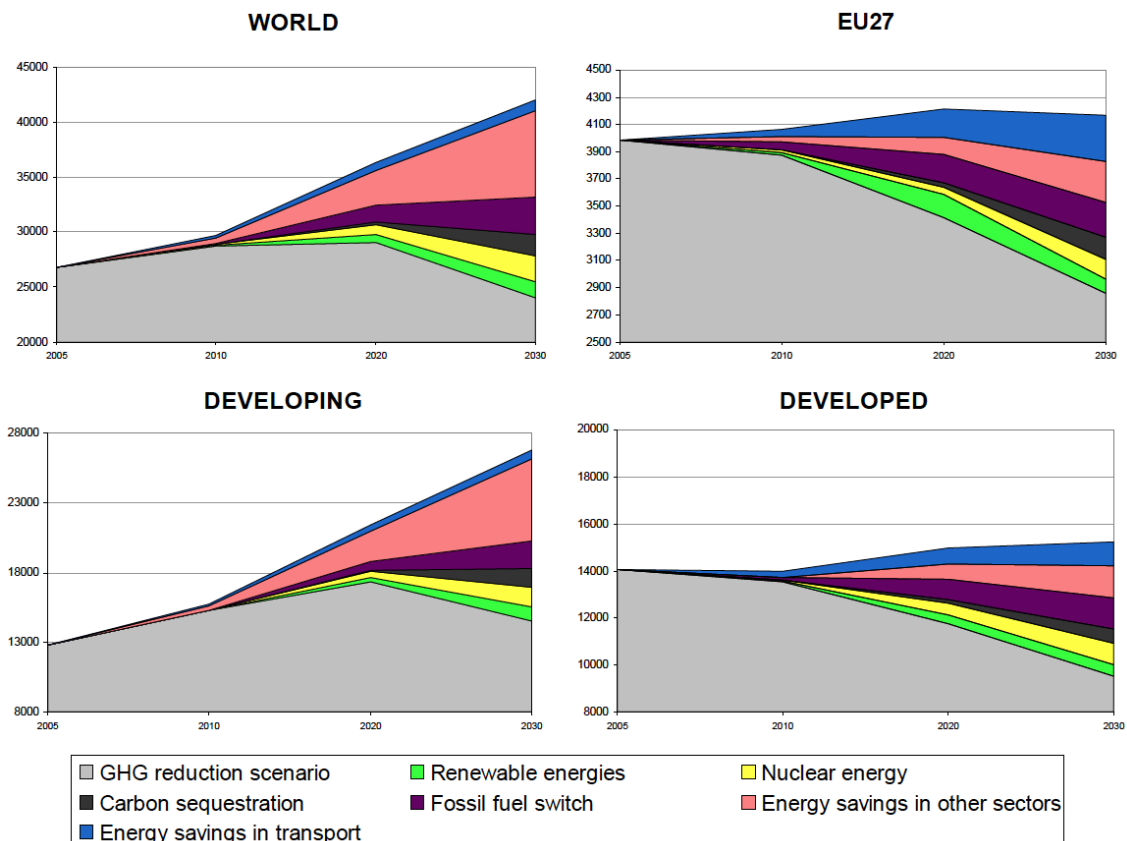
Fuente: IEA (2011)

El escenario 450, necesario para cumplir con los objetivos climáticos establecidos en Cancún, implica la ya mencionada retirada de subsidios energéticos y el establecimiento de un precio para las emisiones de CO₂ (el principal GEI). La Tabla 4 recoge así la senda de precios de CO₂ asociada a cada uno de los escenarios del WEO. En el escenario 450, además de presentarse

una menor contribución de los combustibles fósiles al sistema energético, se contempla que más de la mitad de las plantas de generación eléctrica de carbón cuenten con la Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS) y una mayor participación de las renovables y la nuclear en el *mix* energético. Asimismo, en el sector transporte se considera una gran penetración de vehículos avanzados (híbridos, híbridos enchufables y eléctricos) de aproximadamente el 70% para 2035. Estos cambios permitirían, adicionalmente, una mayor seguridad energética al diversificar las fuentes de energía.

El IPTS (2009) parte de asunciones similares para su valoración económica de las políticas climáticas globales después de 2012. En él se pone de manifiesto las diferencias entre los países avanzados y los emergentes en cuanto a previsiones de reducción de GEI, recogidas en la Figura 2. Así, los países desarrollados disminuyen sus emisiones en 2020 respecto a 1990, mientras que los emergentes alcanzan un máximo entre 2020 y 2025. Esto contrasta con su *Escenario Central*, en el que se pretende conseguir un aumento máximo de la temperatura en 2°C con respecto a los niveles pre-industriales, y que exigiría una significativa reducción de emisiones tanto en los países desarrollados como emergentes en el período contemplado.

Figura 2. Evolución de emisiones de GEI y contribución de las distintas tecnologías



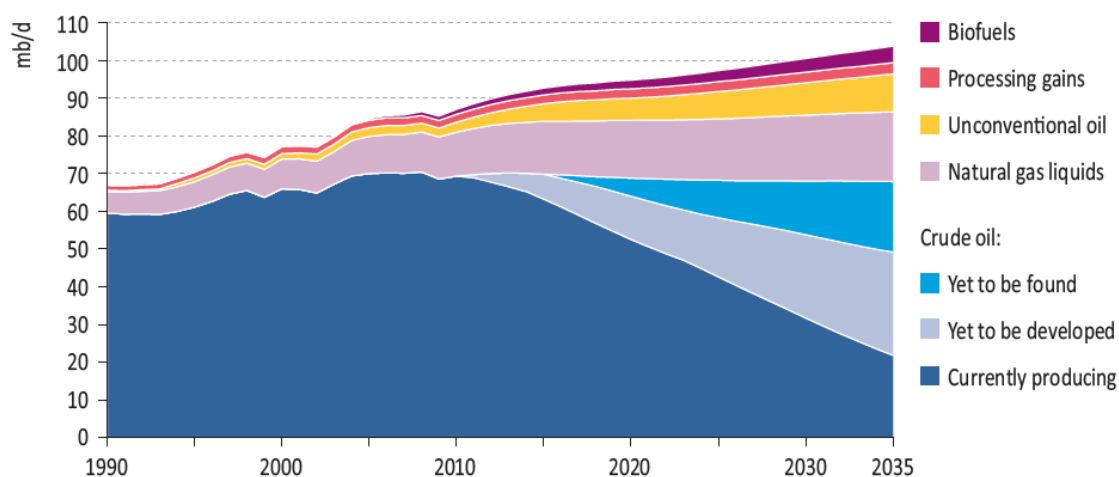
Fuente: IPTS (2009)

3.3. Efectos sobre fuentes de energía tradicionales

De los escenarios anteriores, y tal y como se ha expuesto en otros informes del grupo de trabajo, puede concluirse que el **petróleo** seguirá jugando un papel fundamental en el suministro energético. De hecho, su precio se considera demasiado bajo para que contribuya a favor de un cambio a combustibles alternativos, y se estima que la demanda de petróleo siga aumentando de forma sostenida gracias a los países no pertenecientes a la OCDE. La cantidad de recursos disponibles de este producto, tanto convencionales como no convencionales, determinará las perspectivas de producción global a largo plazo. En el escenario de *Nuevas Políticas* se estima que el máximo de producción del petróleo se producirá después de 2035. Sin embargo, en el escenario 450 dicho máximo se produciría antes de 2020.

En este sentido, se estima que el **petróleo no convencional** juegue un papel cada vez más importante en el futuro, aunque en muchos casos existan esfuerzos por parte de los gobiernos para limitar su demanda. Así, Canadá y Venezuela proveerán los mayores volúmenes de estos recursos, estimándose que las reservas de petróleo no convencional son varias veces mayores que las de petróleo convencional. La Tabla 5 indica la evolución de la producción global de combustibles en el escenario de *Nuevas Políticas*, con las distintas procedencias. Ha de destacarse que el ritmo de extracción dependerá de los costes de extracción y ambientales, y que utilizar petróleos no convencionales implica mayores emisiones de GEI por unidad y medidas de mitigación adicionales (lo que, por tanto, puede exigir encarecer los costes de extracción, internalizando estos efectos).

Tabla 5. Producción de combustible líquidos en el escenario de *Nuevas Políticas*



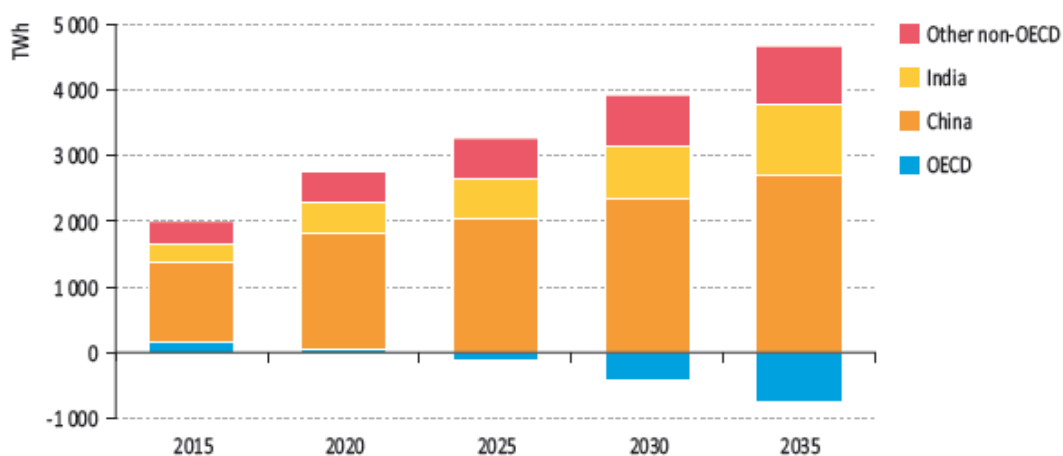
Fuente: IEA (2011)

Por su parte, el **gas natural** será el principal combustible fósil gracias, en gran medida, a China. Este es el único combustible fósil que aumenta su demanda en los tres escenarios del WEO 2011 en 2035. En el escenario de *Nuevas Políticas* crece un 59% en 2035 con respecto a 2009, una quinta parte provendrá, como en el caso del petróleo, de **fuentes no convencionales** en

EEUU y Asia-Pacífico (gas lutita, metano de capas de carbón y gas compacto). Como consecuencia de la menor demanda de gas natural por la crisis económica, el auge de la producción de gas natural no convencional en EEUU y el aumento de la capacidad de **gas natural licuado** (GNL), actualmente hay un exceso de capacidad global de suministro de gas. Este fenómeno podría perdurar, permitiendo unos precios más bajos del gas natural y como consecuencia, una cierta divergencia con la evolución de los precios del petróleo.

Asimismo, el WEO 2011 pronostica que la demanda de energía final en forma de **electricidad** siga aumentando más que cualquier otro tipo de energía: un 2,4% anual entre 2009 y 2035, fundamentalmente desde los países no pertenecientes a la OCDE (en un 80%). No obstante, la generación eléctrica se está transformando hacia tecnologías de bajas emisiones de CO₂ como resultado de la inseguridad de suministro de los combustibles fósiles, su alto precio, así como por las políticas de limitación de GEI. Por ello, la utilización de combustibles fósiles para el sector eléctrico experimentará un gran aumento en los países fuera de la OCDE, pero será compensado por los miembros de la OCDE, produciéndose una reducción global relativa de la intensidad de CO₂. En consecuencia, gracias al cambio a favor de las energías renovables, la energía nuclear y las nuevas tecnologías de bajas emisiones, se espera que la cantidad de CO₂ por MWh generado se reduzca un 30% para 2035. La Tabla 6 refleja este comportamiento y evolución.

Tabla 6. Electricidad producida con carbón en el escenario de *Nuevas Políticas*

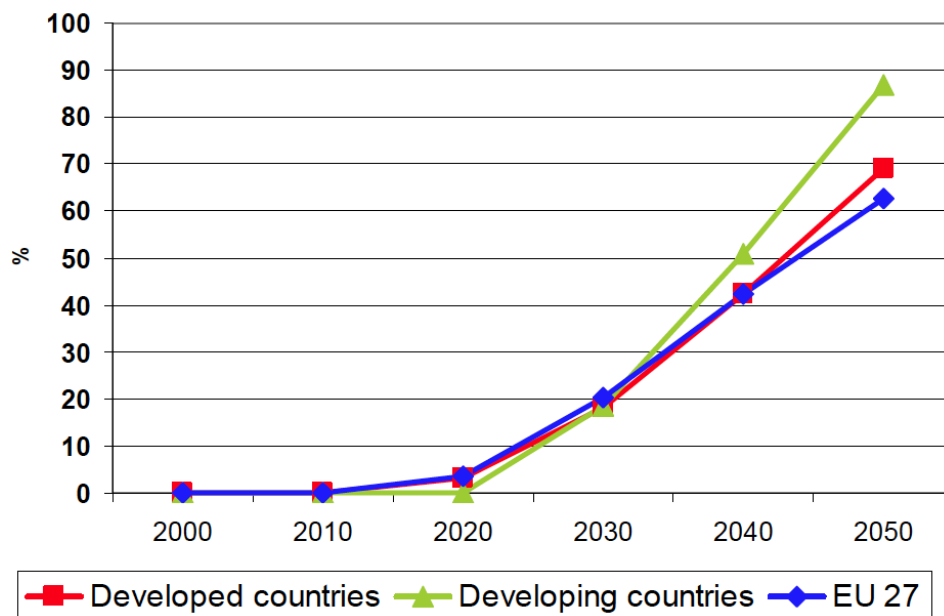


Fuente: IEA (2011)

Para el IPTS las medidas de **eficiencia** son fundamentales para conseguir las reducciones de emisiones de GEI e influirán sobre las fuentes energéticas tradicionales. Así, en el sector eléctrico se contempla un gran potencial para mejorar de manera eficiente los costes de los distintos tipos de plantas de generación existentes tanto en países en desarrollo como en países desarrollados, particularmente en China, India y EEUU. También se pueden dar importantes ganancias de eficiencia con la mejora del sistema de generación de energía, de transporte y distribución, con la integración efectiva de las fuentes de energía renovables o la generación distribuida. Las redes eléctricas inteligentes, líneas con superconductores eléctricos y dispositivos de almacenamiento de energía hidroeléctrica (desde el bombeo a baterías de nueva

generación) serán tecnologías cruciales. Por ello, se tenderá no solo a menos intensidad de combustibles basados en carbono sino también a mejoras de eficiencia que impliquen un cambio sustancial de tecnologías (por ejemplo, el remplazo de calderas de fuel por turbinas de gas de alta eficiencia).

Figura 3. Importancia de CCS en el sector eléctrico

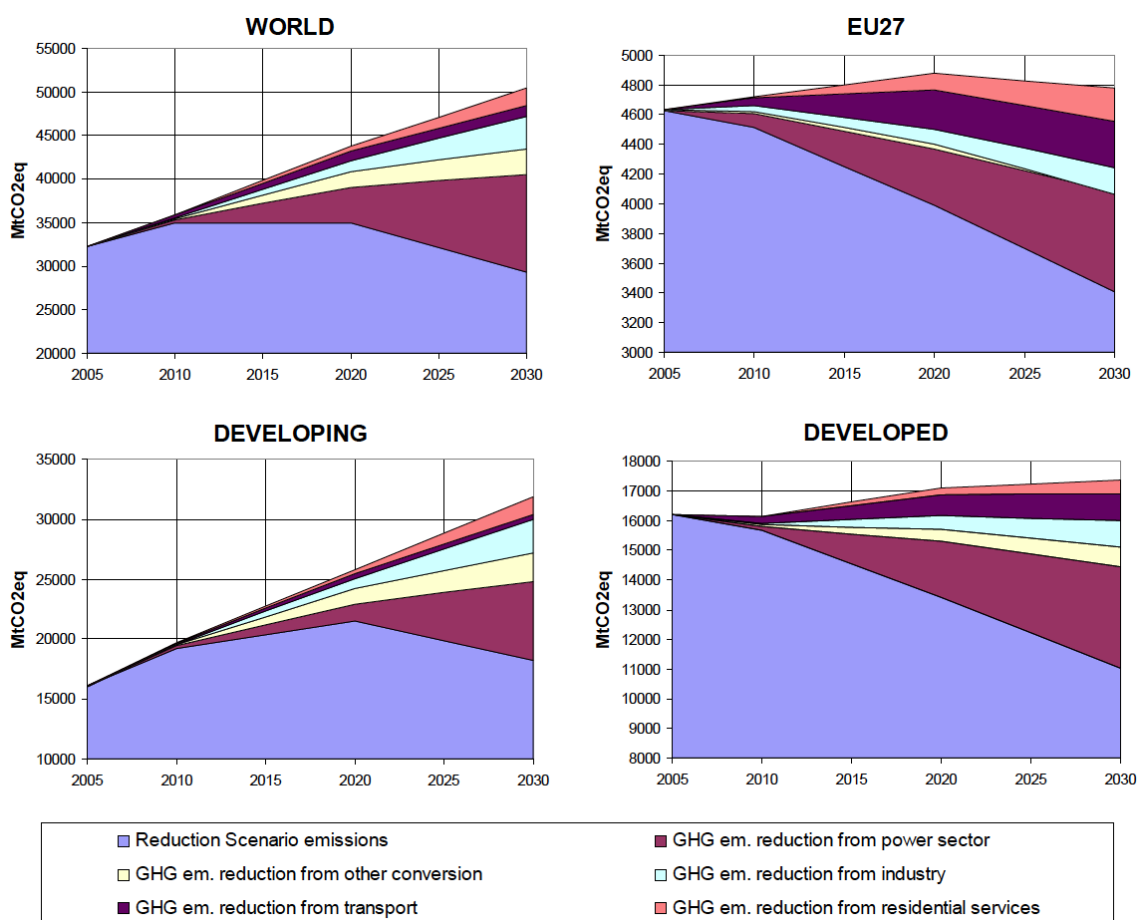


Fuente: IPTS (2009)

El informe del IPTS también considera que desde un punto de vista sectorial más de la mitad del potencial de reducción de emisiones se encuentra en el sector de generación eléctrica (Figura 4), tal y como avanzaba el WEO con anterioridad. En segundo lugar se encuentra la industria, mientras que sectores como el residencial o el transporte muestran menor ritmo de cambio tecnológico.

Como en el caso del WEO 2011, el *Escenario Central* del informe del IPTS prevé un incremento de la demanda eléctrica de 160% para 2030. Pero el mix de generación eléctrica cambiaría radicalmente porque las tecnologías libres de carbono (renovables y nuclear) supondrían un 55% de la electricidad producida en 2030. Se espera también una gran contribución por parte de la **captura y almacenamiento de carbono** (CCS) para la reducción de las emisiones de GEI desde el sector eléctrico (18% de CCS en la generación eléctrica con combustibles fósiles en 2030). Se estima que la expansión de esta tecnología tenga un gran potencial en EE.UU y China, y relativamente pequeño en Unión Europea. La Figura 3 recoge el porcentaje de emisiones de GEI capturadas en el sector eléctrico a través de tecnologías de CCS, lo que implica que la mayoría de las nuevas plantas de combustibles fósiles que se construyan después de 2020 incorporarán este procedimiento.

Figura 4. Reducciones sectoriales de GEI por regiones del planeta



Fuente: IPTS (2009)

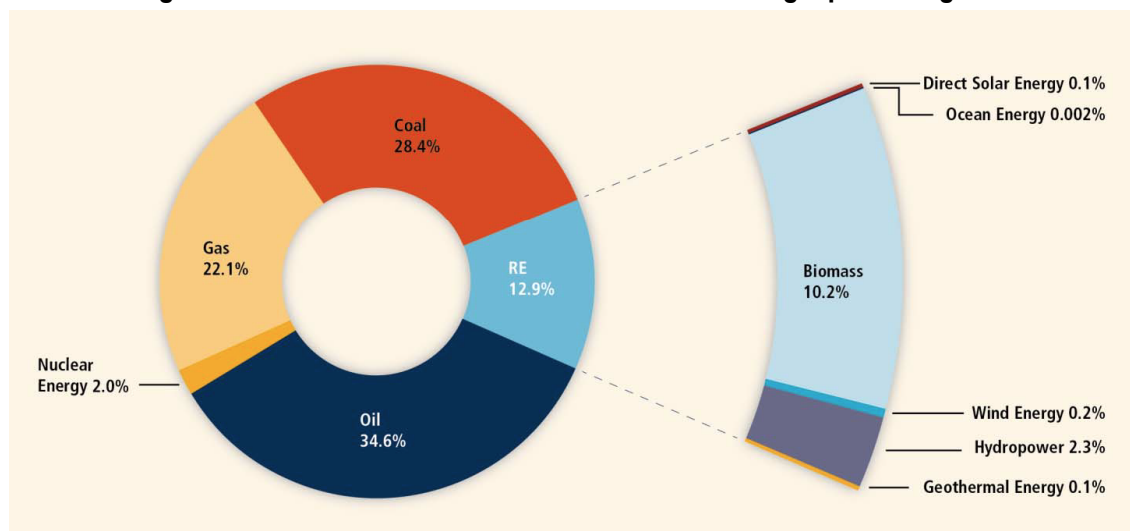
3.4. El papel de las energías renovables

En los escenarios anteriores se observó el importante papel de las energías renovables en la prospectiva energética mundial. Además de tener un gran potencial para reducir las emisiones de GEI, estas energías pueden proporcionar otros beneficios: contribuir al desarrollo económico y social, dar acceso a la energía, reducir la dependencia energética y reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud por las emisiones de otros contaminantes. No obstante, el mayor papel de estas energías se relacionará con la mitigación de las emisiones de GEI y será contingente a la aplicación de políticas públicas para su promoción.

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 suministrada. 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, con un menor papel de la energía hidráulica (2,3%). Adicionalmente, en 2008 las

energías renovables contribuyeron un 19% en la generación eléctrica, tal y como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Contribución de distintas fuentes a la energía primaria global



Fuente: IPCC (2011)

La expansión de las energías renovables se ha incrementado en los últimos años debido principalmente a los elevados precios de los combustibles fósiles, al aumento de la demanda energética, al apoyo público y a la disminución del coste de los equipos. Se ha observado que el despliegue ha sido mucho más intenso en la producción de electricidad, tanto por las características de este sector como por la mayor disponibilidad de tecnologías renovables eléctricas. Así, en escenario de *Nuevas Políticas* del WEO la generación basada en energías renovables se triplica entre 2009 y 2035. Este incremento se atribuye principalmente a las fuentes de eólica e hidráulica. Aunque en el WEO la fotovoltaica tenga un rápido aumento, su participación en la generación global sólo alcanza el 2% en 2035. China encabeza la producción eólica y fotovoltaica, 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. El WEO prevé además que aumente el uso de los biocombustibles en el transporte (entre un 3% y un 8%). EEUU, Brasil y UE seguirán siendo los mayores productores y consumidores, si bien para competir con el petróleo necesitan un gran apoyo público.

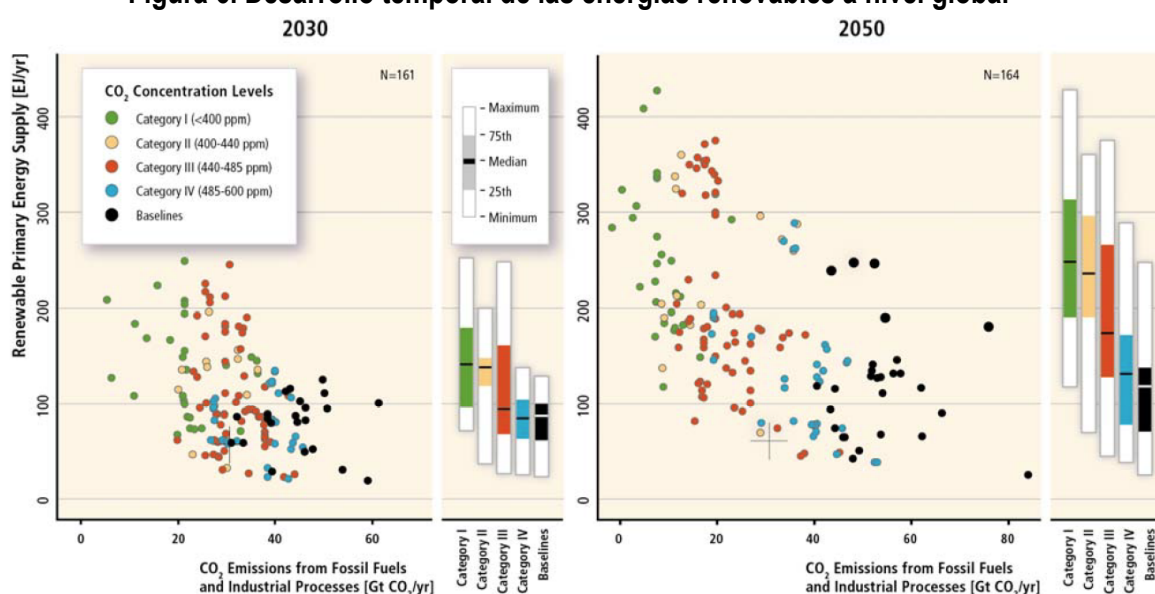
Por su parte, el SRREN considera que en la mayoría de los 164 casos analizados habrá un aumento significativo en el despliegue de la energía renovable para el año 2030 y 2050, tal y como se observa en la Figura 6. Más de la mitad de los escenarios esperan una contribución de las renovables de más de 17% en 2030, incrementándose a más del 27% en 2050. Los escenarios más optimistas alcanzan un 43% en 2030 y un 77% en 2050.

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 entre las hipótesis. 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 7.

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.

Figura 6. Desarrollo temporal de las energías renovables a nivel global

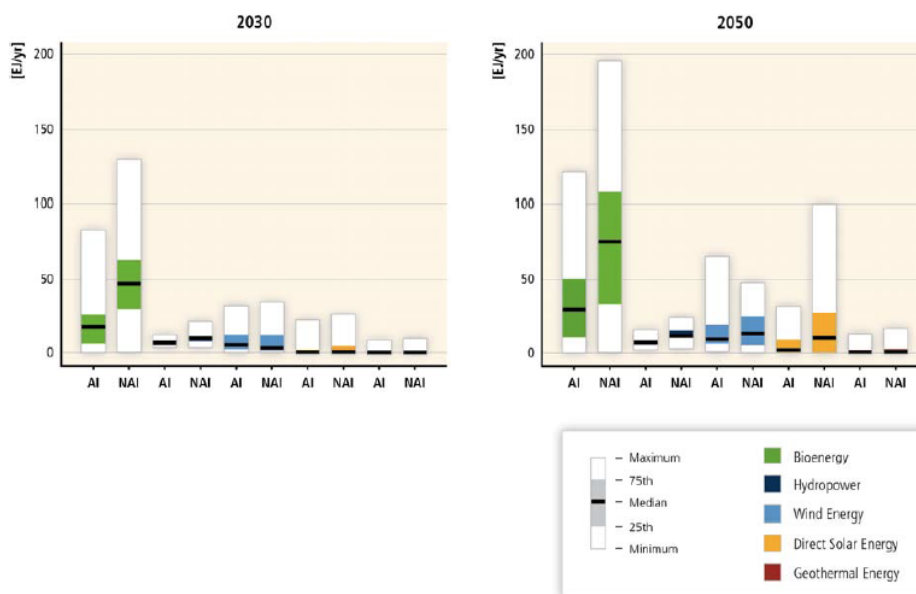


Nota: Suministro global de energía primaria renovable de 164 escenarios a largo plazo en comparación con las emisiones de CO₂ de origen fósil y de la industria en 2030 y 2050. Los paneles a la derecha de los diagramas de dispersión muestran los niveles de despliegue de la energía renovable en cada uno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

Fuente: IPCC (2011)

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 del potencial técnico de las energías renovables. 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, aunque probablemente el efecto sea pequeño). Para la hidroeléctrica, se espera que los impactos sean ligeramente positivos al aumentar globalmente las precipitaciones. Para la eólica tampoco se pronostica un gran impacto, pero sí algunos cambios en la distribución de los recursos eólicos. En la geotérmica y marina no se prevén cambios significativos.

Figura 7. 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)

3.5. Perspectivas tecnológicas

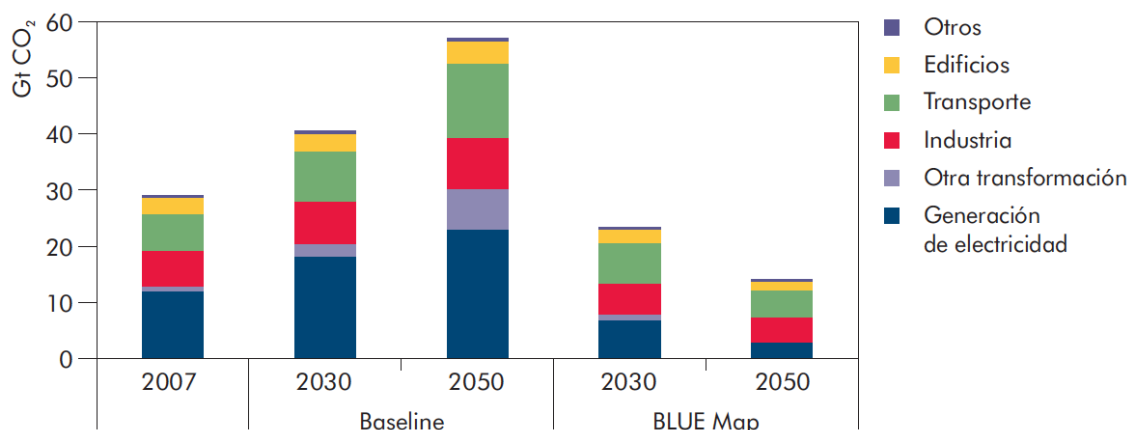
Los modelos de predicción consideran decisiva a la actual década para alcanzar la reducción del 50% de emisiones de GEI para el año 2050 con respecto al 2005. Esto es así porque que el objetivo de Cancún será difícilmente alcanzable si las emisiones no llegan a un máximo alrededor de 2020 para luego bajar de forma constante. Para avanzar hacia un sistema energético sostenible que cumpla con estos requisitos, la IEA (2010) analiza las transiciones tecnológicas necesarias en su informe Perspectivas sobre Tecnología Energética 2010 (ETP). La Figura 8 recoge la evolución de las emisiones en el escenario actual y en un escenario tecnológico que permite grandes y rápidas reducciones de emisiones de GEI.

El ETP 2010 parte del escenario de referencia del WEO 2009 para 2030 y lo amplía hasta 2050 con el supuesto de que los gobiernos no acometan nuevas políticas energéticas ni climáticas. Así se compara una tendencia pesimista de emisiones de CO₂ hasta el 2050 con el denominado escenario *BLUE Map*, donde se fija la meta de reducir al 50% las emisiones mundiales de CO₂ a través de transiciones tecnológicas que sean coste-efectivas. En la Figura 9 se pueden observar las tecnologías clave para reducir las emisiones de CO₂ conforme al escenario *BLUE Map*.

Ya se avanzó la necesidad del apoyo público a las renovables para reducir el riesgo, estimular el despliegue y bajar los costes para los inversores en las primeras etapas del desarrollo tecnológico. La IEA (2010) calculó así que el para lograr la reducción del 50% de emisiones de

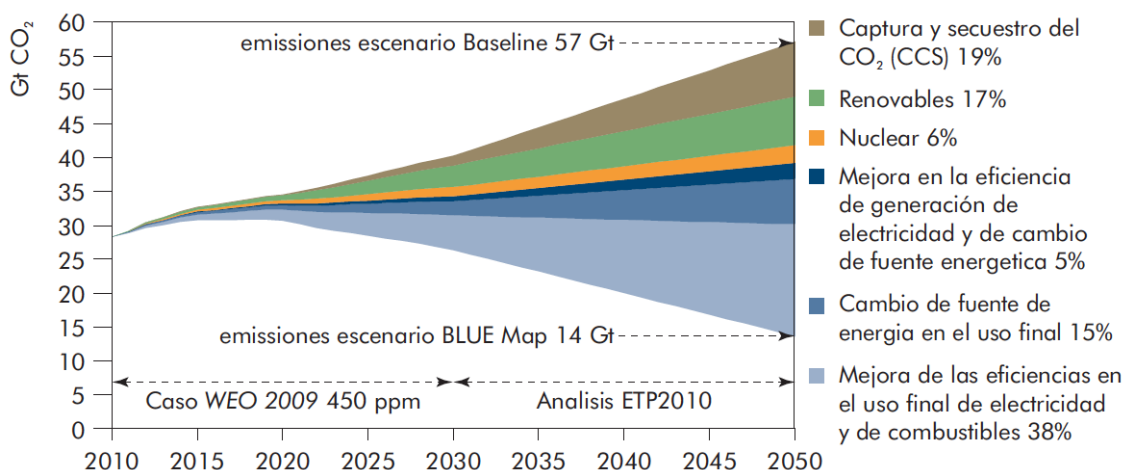
CO₂, el apoyo gubernamental deberá situarse entre dos y cinco veces sobre los niveles actuales. La creciente demanda energética esperada conllevará inversiones considerables, calculadas en 270.000 MUS\$ entre 2010 y 2050, fundamentalmente relacionados con equipos de utilización final de la energía (principalmente vehículos, electrodomésticos y plantas industriales). Si estas inversiones se realizasen con las premisas del escenario *BLUE Map*, las inversiones serían un 17% más caras (316.000 MUS\$) pero se conseguirían unos ahorros netos de 8.000 MUS\$ por menor uso de combustibles.

Figura 8. Evolución de las emisiones de CO₂ con y sin forzamiento tecnológico



Fuente: IEA (2010)

Figura 9. Tecnologías necesarias para reducir las emisiones de CO₂ (BLUE map)



Fuente: IEA (2010)

Aproximadamente un 65% de las emisiones actuales de CO₂ pueden atribuirse al suministro y uso de energía. Puesto que este porcentaje no está repartido de forma equitativa en todos los sectores, cada sector debería reducir sus emisiones de forma diferente teniendo en cuenta sus opciones disponibles. Así, en la actualidad el sector eléctrico representa el 41% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, que se duplicarían hasta 2050 en el escenario inicial por un mayor uso de combustibles fósiles. En cambio, el escenario de *BLUE Map* alcanza una

reducción de casi el 90% (comparada con los niveles de 2007), a través de las energías renovables (50%), la nuclear (25%) y la adopción generalizada de CCS. Este fenómeno es congruente con lo avanzado por el informe del IPTS.

Como ya se ha comentado, producir electricidad más limpia crea oportunidades para reducir las emisiones de CO₂ en el consumo de energía de otros sectores. Para ello es recomendable que se tienda a la electrificación de los grandes sectores consumidores de combustibles fósiles (transporte, residencial y servicios, industria, etc.). Las emisiones directas industriales representan alrededor de 20% de las emisiones actuales de CO₂ por lo que será necesario suministrar a la industria la mejor tecnología actual disponible, así como el diseño y despliegue de una gama de nuevas tecnologías. Entre ellas también puede jugar un papel importante la CCS para sectores industriales que consumen mucha energía (como hierro y acero, cemento, etc.).

Por su parte, las emisiones directas de los edificios representan aproximadamente el 10% de las emisiones mundiales de CO₂, aunque si se incluyesen las emisiones indirectas del uso de la electricidad el porcentaje aumentaría hasta el 30%. En este sector se debe diferenciar entre las perspectivas para los países emergentes y los de la OCDE, cuyo potencial radica en modernizar y adquirir nuevas tecnologías para los inmuebles existentes. Por el contrario, en los países emergentes, con un mayor crecimiento de nuevas edificaciones, existen oportunidades para garantizar ahorros importantes de energía si se aplican normas de eficiencia exigentes para las nuevas construcciones.

Finalmente el 23% de las emisiones de CO₂ actuales provienen al sector transporte. Para el escenario de referencia, se duplican las emisiones de vehículos para el transporte de personas y la aviación hacia 2050. Sin embargo, en el escenario *BLUE Map* las emisiones son aproximadamente un 60% inferiores a las de 2007, fundamentalmente por los efectos dentro de la OCDE. Las medidas a tomar en el sector transporte pasan por el fomento del transporte público y ferrocarril, por la mejora de la eficiencia de los motores de combustión interna, el cambio de combustibles fósiles por la propulsión eléctrica y por un mayor uso de pilas de combustible. En el escenario *BLUE Map* los biocombustibles, la electricidad y el hidrógeno representan juntos el 50% del total de combustibles utilizados para el transporte en 2050.

3.6. *A modo de conclusión*

En las secciones precedentes he subrayado la coincidencia esencial entre los principales análisis prospectivos, llevados a cabo por la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPTS) y el servicio de estudios económico-tecnológico de la Comisión Europea (IPTS). En todos los casos se prevé una creciente tendencia a la electrificación de las economías futuras, que coincide con una fuerte descarbonización de esta industria: fundamentalmente a través de un papel central de las

energías renovables y, en menor medida, de la energía nuclear. Este fenómeno, sin embargo, no implica la desaparición del uso de los combustibles fósiles sino su menor peso relativo en el sistema energético y la adopción a gran escala de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Además, en todos los análisis prospectivos precedentes, la eficiencia energética es crucial para conseguir los objetivos climáticos establecidos en la cumbre de Cancún.

Los anteriores estudios prospectivos asumen una fuerte involucración pública en la promoción de fuentes renovables que, junto a la existencia de un precio internacional sobre las emisiones de GEI, provocaría una mayor adopción de las tecnologías bajas en carbono. La promoción de renovables permitiría conseguir objetivos no climáticos y un ahorro en los gastos en combustibles del sistema energético, lo que reduciría el coste de las inversiones adicionales sobre un escenario sin políticas.

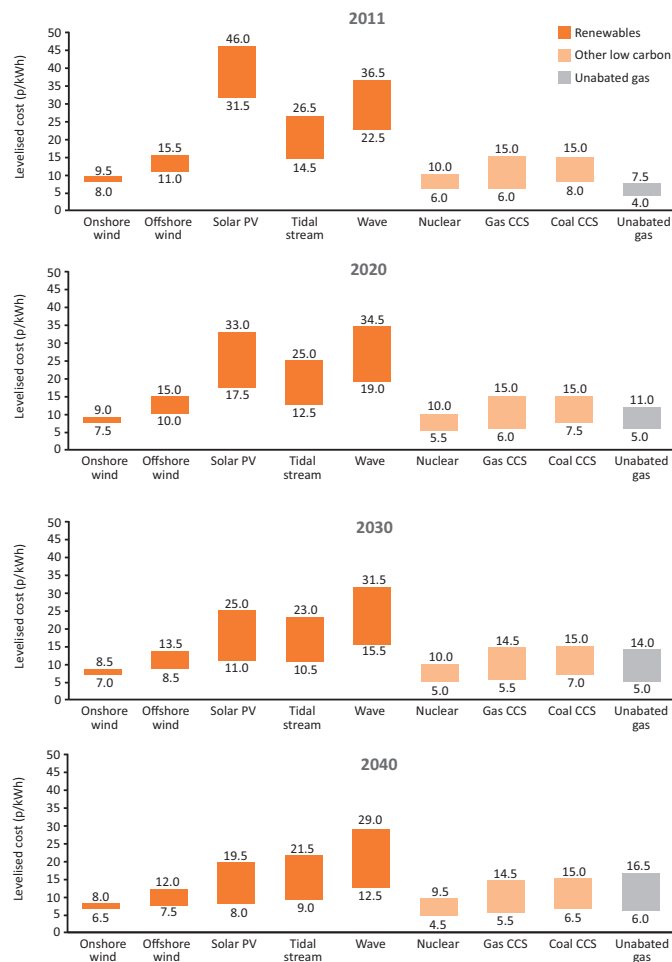
En dos trabajos recientes del Instituto Universitario Europeo, Delarue et al. (2011) y Meeus et al. (2011) presentan los resultados de otros cuatro estudios prospectivos sobre el futuro del sector eléctrico europeo en un entorno de cuasi-descarbonización para 2050. Además de incluir las previsiones de la IEA, se incorporan los resultados de Euroelectric (asociación de las eléctricas europeas), EGAF (Foro Europeo de Defensa del Gas), ECF (Fundación Climática Europea) y Greenpeace. En general, las conclusiones de estos análisis son bastante coincidentes con las avanzadas por los estudios anteriores: consecución de los objetivos de Cancún a través de mayor eficiencia energética y un creciente papel de las renovables. Menos unanimidad existe en el papel de la energía nuclear y CCS (no contempladas por el estudio de Greenpeace) y en el uso de instrumentos para la promoción de renovables (el estudio de Euroelectric contempla el desarrollo de renovables solo por los efectos del Sistema Europeo de Comercio de Emisiones (SECE) a partir de 2020, sin que continúe el sistema explícito de promoción pública.

Las conclusiones de los trabajos previos se relacionan con los desarrollos observados en el diseño de la prospectiva energética hacia 2050 para diversos países de la UE: Dinamarca, Alemania, Reino Unido, Francia e Irlanda (Meeus et al., 2011). Esto pone de manifiesto los crecientes riesgos de fragmentación de la política energética y climática europea, aunque también aparecen oportunidades para definir un marco común a partir de las incipientes actuaciones nacionales.

No obstante, antes de finalizar esta sección del informe es conveniente matizar algunas de las conclusiones anteriores a la luz de aportaciones recientes. Así, por ejemplo, Herold et al. (2010) consideran que el papel futuro de las tecnologías de CCS se ve seriamente comprometido por las importantes necesidades logísticas que necesitaría una extensión a gran escala de esta alternativa. Por ello consideran que su papel como 'puente' hacia un sistema energético descarbonizado es probablemente una utopía, lo que obviamente tendría importantes efectos sobre la prospectiva tecnológica avanzada los estudios anteriores. Esto recomienda ser cauto sobre el papel que pueden jugar estas tecnologías en el largo plazo, sin que lo precedente signifique renunciar a su investigación y consideración.

Precisamente, Moselle (2011) considera el CCS como una de las alternativas más relevantes para el futuro sistema energético descarbonizado. En una propuesta ciertamente controvertida, este autor defiende la necesidad de reorientar las políticas de promoción de renovables europeas para favorecer su utilización futura a nivel global. Para ello sugiere centrarse en tecnologías que sean utilizables globalmente a costes bajos y que, por tanto, permitan conseguir los objetivos climáticos globales a mediados de este siglo. Esto podría conseguirse reorientando los sistemas de apoyo europeos a renovables, dirigiendo buena parte de los recursos a la investigación básica (*learning by research*) en vez de al despliegue rápido (*learning by doing*), y concentrando los esfuerzos en dos tecnologías clave a nivel global: CCS, solar fotovoltaica. La Figura 10 recoge una estimación de los costes de tecnologías bajas en carbono para un intervalo temporal elevado (2011, 2020, 2030 y 2040), lo que justificaría la aplicación selectiva de la promoción de renovables en aquellas tecnologías que demuestren una evolución de costes favorables y que sean de utilidad global (lo que limitaría, por ejemplo, las posibilidades de energías renovables marinas).

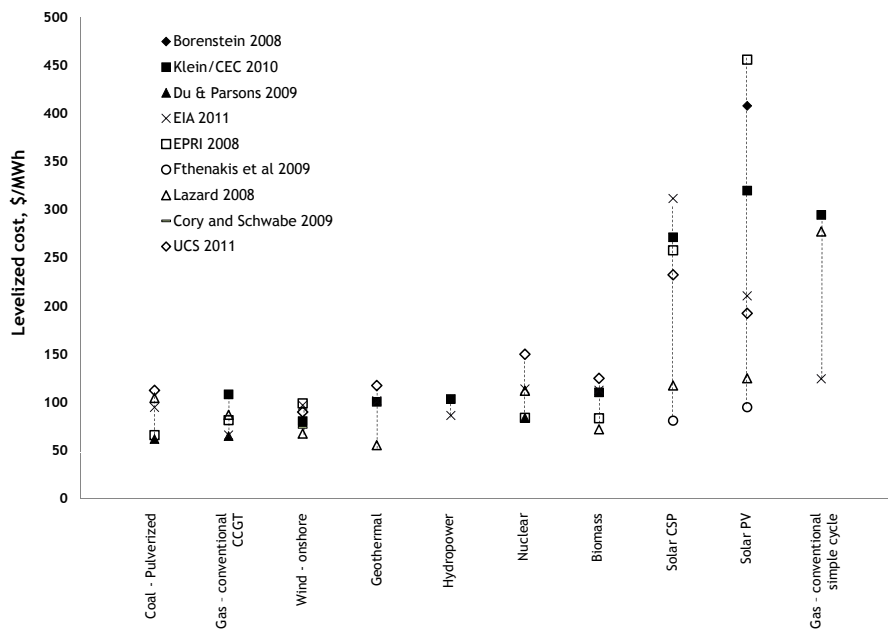
Figura 10. Costes estimados de tecnologías bajas en carbono (2011-2040)



Fuente: Moselle (2011)

Por último, y en relación con lo precedente, Borenstein (2011) reconoce la relevancia de los análisis coste-beneficio para justificar un apoyo selectivo a las tecnologías renovables. No obstante, plantea que los beneficios de estas tecnologías son fundamentalmente ambientales (no solamente climáticos), sin que los denominados dividendos adicionales jueguen un papel relevante. Este autor señala la importancia de desarrollar investigaciones profundas y *ad-hoc* sobre estos asuntos al ser los beneficios de las fuentes renovables fuertemente idiosincráticos por depender de su localización y de las características de las tecnologías que sustituyen. La Figura 11 resume los costes de las distintas tecnologías renovables según diversos estudios, mostrando la elevada divergencia de resultados en ciertas renovables.

Figura 11. Costes estimados de diversas tecnologías energéticas



Fuente: Borenstein (2011)

4. Prospectiva regulatoria global y subcentral

En este apartado pretendo aproximarme a las políticas climáticas desde una visión prospectiva. Para ello avanzaré, sin ánimo de exhaustividad, algunas de las tendencias que están viviendo los instrumentos con objetivos climáticos en la actualidad e intentaré complementar lo apuntado en la sección anterior con referencias a las políticas de eficiencia energética y de promoción de tecnologías bajas en GEI. Puesto que el informe ha sido encargado por una administración subcentral, intentaré abordar algunas de estas cuestiones desde esta perspectiva. Comienzo refiriéndome al contexto general de las políticas climáticas (adaptación y mitigación) para después abordar la asignación jurisdiccional de estas políticas y detallar algunos aspectos de diseño en el segundo óptimo. Me intereso posteriormente por los instrumentos de precio, fundamentales (para los economistas) en las políticas climáticas, ocupándome de sus efectos en términos de eficiencia energética, desarrollo tecnológico y coste-efectividad. La interacción de instrumentos, crucial para entender las complejas climáticas actuales (intra e inter jurisdiccionales) también se ve reflejada en este apartado. Buena parte de esta sección se basa en Labandeira (2011), aunque me he limitado a recoger aquí las cuestiones que pueden tener más relevancia para la discusión y aplicación de instrumentos de política climática en el futuro.

Aunque las políticas contra las emisiones de GEI siguen poniendo énfasis en la mitigación y en la preferencia por soluciones aplicables globalmente, en este ámbito se ha ido configurando un nuevo entorno durante los últimos años. En primer lugar, porque las mencionadas dificultades para la obtención de acuerdos internacionales globales efectivos han sido evidentes desde el fracaso de la cumbre de Copenhague. En segundo lugar porque, ante la ausencia de medidas ambiciosas y coordinadas de mitigación de las emisiones globales de GEI, dentro de las estrategias contra el cambio climático se ha ido abriendo paso el papel de la adaptación. A estas alturas es muy probable que los efectos negativos asociados al cambio climático sean inevitables, incluso con una inmediata mitigación de emisiones a gran escala, por lo que las políticas públicas de adaptación exigen una consideración explícita. En particular, la adaptación de los agentes puede ser autónoma (cambios en el comportamiento ante modificaciones en el clima) o inducida por los decisores públicos a través de instrumentos que favorezcan la adaptación (por ejemplo, aislamiento térmico de viviendas).

A mayores, es previsible que las políticas públicas de adaptación tengan también un elevado componente infraestructural, con la provisión de medios que permitan a ciudadanos y empresas adaptarse a los cambios climáticos allí donde las modificaciones de comportamiento no sean suficientes o posibles. En este caso nos situamos en un contexto familiar de provisión de bienes públicos en el que, no obstante, la adaptación introduce una importante novedad al ser apropiable localmente. Por ello es ahora posible limitar los comportamientos estratégicos que dificultan la mitigación global, con unidades administrativas sub-centrales incentivadas a llevar a

cabo políticas que en muchos casos tienen un elevado componente local. Surge así la necesidad de arbitrar ingresos para las administraciones sub-centrales que se encarguen de llevar a cabo políticas de adaptación basadas en la provisión de elementos con características de bienes públicos. Ingresos que deberían proceder de fuentes tributarias ahora asignadas a otros niveles jurisdiccionales, de la modificación de tributos sub-centrales o de nuevas figuras impositivas.

La discusión sobre la asignación jurisdiccional de políticas climáticas no se ha limitado, sin embargo, al ámbito de la adaptación. Durante los últimos años se han visto abundantes aplicaciones de políticas de mitigación a nivel sub-central. Las razones son básicamente dos: la reacción por parte de gobiernos locales o regionales a la parálisis de entidades nacionales o supra-nacionales en este campo, y la necesidad de complementar las políticas generales de mitigación con instrumentos regulatorios locales (planificación urbanística, gestión de infraestructuras de transporte, etc.). Lo primero explica el creciente interés de muchas administraciones sub-centrales en los instrumentos de precio para la mitigación de GEI, particularmente en los EE.UU, y abre posibilidades y complejiza el diseño de las futuras políticas climáticas.

En todo caso, la posible aplicación sub-central de medidas para la mitigación de emisiones de GEI debería enmarcarse en un contexto más amplio de federalismo fiscal. Podrían incluirse aquí niveles mínimos de tributación, sistemas de transferencias compensatorias entre territorios, etc. En particular, sería necesario evitar un fenómeno especialmente peligroso y principal obstáculo de la mitigación a gran escala: la deslocalización de emisiones a territorios con regulaciones climáticas más laxas o inexistentes. Claramente, es absurdo que una política climática lleve a un mero cambio de la ubicación de las emisiones de GEI porque implicará costes económicos para el territorio que lo aplica, en términos de producción o empleo, sin ninguna ganancia ambiental.

Un fenómeno como el precedente podría abordarse en el ámbito internacional mediante la aplicación simultánea de impuestos (u otro tipo de precios) sobre las emisiones de GEI y de ajustes impositivos en frontera para los productos procedentes de zonas sin regulaciones climáticas. Aunque los acuerdos mundiales de comercio establecen restricciones legales al uso de estos mecanismos, e incluso su propio funcionamiento puede exigir niveles excesivos de información, sería conveniente profundizar en el estudio de esta alternativa. Esto es así porque dichos ajustes pueden jugar un importante papel en el fomento de acuerdos internacionales de reducción de GEI y porque, de no existir, la efectividad ambiental de las políticas climáticas nacionales podría verse seriamente comprometida. La fuerte disparidad entre la evolución de las emisiones de CO₂ realizadas en el Reino Unido (-0,5%) y las globales atribuibles a los consumidores británicos entre 1990 y 2004 (+15%) indican la relevancia de este fenómeno (Druckman y Jackson, 2009).

Hay, en todo caso, tantos condicionantes para las políticas climáticas que es necesario aproximarse a ellas desde una aproximación de segundo óptimo. Es evidente que los diversos objetivos que se encuentran tras las políticas climáticas no permiten una visión unidireccional, centrada en la protección ambiental o en la obtención de ingresos. Además, como indiqué anteriormente, la gran relevancia de la energía en las sociedades contemporáneas hace imprescindible extender el análisis más allá de la eficiencia, incluyendo la distribución intra e inter países e intra e inter generaciones. Por último, este instrumento convive con otros mecanismos que también actúan para la consecución de sus variados objetivos y pueden generar sinergias positivas o interacciones negativas que es necesario analizar y resolver.

Dentro de las políticas climáticas de mitigación, los impuestos de base energética se han configurado como los instrumentos preferidos por los economistas. Esto se debe a que, como todo instrumento de precio, consiguen las reducciones de emisiones a mínimo coste (eficiencia estática) y fomentan la introducción continua de tecnologías limpias para evitar pagos impositivos futuros (eficiencia dinámica). Los precios, en realidad, permiten superar el problema de información asimétrica entre regulador y regulado e inducen a la igualdad de los costes marginales de reducción de emisiones entre todos los contaminadores: algo especialmente positivo cuando hay gran heterogeneidad entre estos por razones tecnológicas (distinta obsolescencia o diferencias sectoriales).

Sin embargo, ese 'mantra' de la imposición energética con objetivos ambientales presenta sus limitaciones en contextos de segundo óptimo. Entonces, las restricciones distributivas u otras barreras a la viabilidad socio-política de estas figuras pueden dificultar su correcta operación (tipos insuficientes para conseguir objetivos). Los fallos de mercado, o de la regulación, pueden también afectar a su correcto funcionamiento y exigir otras aproximaciones simultáneas (en teoría, peores): por ejemplo, la combinación niveles adecuados de precios con estándares convencionales o medidas de información para la consecución de ahorro energético (Linares y Labandeira, 2010). Asimismo, la presencia de una doble externalidad (climática y de innovación) demanda actuaciones públicas fuera del ámbito del control de las emisiones para promover el desarrollo tecnológico (Newell, 2010), a las que ya me he referido con anterioridad.

Es habitual además que en las políticas climáticas de los países avanzados exista más de un instrumento de precios. En ese caso la eficiencia estática exige evitar fenómenos de doble imposición y que los precios sean iguales a lo largo de la economía, haciendo necesario mecanismos de coordinación. En la Unión Europea la coexistencia SECE, aplicado sobre un número limitado de sectores, con la tributación energética con objetivos climáticos ilustra estas cuestiones. Aunque la doble imposición puede evitarse de una forma relativamente sencilla, creando exenciones tributarias para los consumos energéticos de los sectores sujetos al mercado, la equiparación de precios es más compleja.

Una primera opción para coordinar el SECE y la tributación sobre las emisiones de GEI de los sectores no sujetos al mercado (mayoritariamente 'difusos') sería modificar, ex-post, el tipo impositivo de la tributación energética para igualarlo al precio del mercado. Obviamente, este mecanismo es imperfecto porque la volatilidad de precios y la rigidez de la legislación fiscal pueden dificultar un ajuste adecuado. Una segunda opción sería tomar el tipo impositivo como objetivo para el precio de mercado y actuar institucionalmente, por ejemplo a través de un ente regulador que comprase o vendiese permisos para garantizar la estabilidad de precios. Una alternativa más sofisticada consistiría en la introducción de un sistema híbrido entre el comercio de emisiones y la tributación en el que el gobierno se comprometiese a vender permisos una vez que los precios superasen un máximo pre-establecido (garantizando una especie de 'válvula de escape') y viceversa, con el establecimiento implícito de un corredor de precios (Murray et al., 2009). En los tres casos anteriores podría conseguirse, además de la eficiencia estática, una señal de precios suficiente y consistente para el desarrollo de tecnologías energéticas bajas en GEI.

Aunque una adecuada señal de precios es condición necesaria para el desarrollo de tecnologías limpias que permitan sistemas energéticos virtualmente descarbonizados a mediados de siglo, en general los precios no son suficientes para este fin (Nordhaus, 2010). La presencia de una externalidad asociada a la innovación, ya apuntada con anterioridad, y las dificultades socio-políticas para que los precios sobre las emisiones de GEI tengan el nivel necesario, exigen el empleo de medidas complementarias. Éstas pueden configurarse como sistemas públicos de promoción de tecnologías bajas en emisiones de GEI, a las que me referí en las secciones anteriores. La cuestión es cómo diseñar estos paquetes de promoción para que los objetivos se alcancen al mínimo coste posible, lo que implica distribuir de una manera óptima los recursos dedicados a la investigación básica y a la difusión de tecnologías cuasi-maduras, prestar una especial atención al diseño de los mecanismos de promoción y concentrarse en las tecnologías que pueden jugar un papel global en la reducción de las emisiones de GEI a costes asumibles (ver sección 3.6).

Los análisis prospectivos tecnológicos, presentados en el tercer apartado de este informe, coincidían también en la importancia de la eficiencia energética para conseguir el objetivo climático establecido por la cumbre de Cancún. No obstante, las políticas de eficiencia energética son complejas y exigen comprender las diferencias entre aproximaciones ingenieriles (habitualmente muy optimistas) y económicas (que intentan explicar las dificultades para que se materialice este concepto en muchos casos). Estas últimas permiten explicar, además, el efecto rebote generado por el abaratamiento de la energía en términos relativos. La clave para conseguir una mayor eficiencia energética es, en todo caso, entender los efectos sobre el comportamiento de los agentes de las distintas políticas energéticas, superando los múltiples fallos de mercado que dificultan su consecución (Convery, 2011). Así, solo será posible avanzar

en esa dirección mediante la combinación de instrumentos de precios (energéticos) con otras alternativas regulatorias (como en el caso de las políticas tecnológicas o climáticas en sentido amplio), a través del suministro de más información que reduzca los costes de transacción para los agentes, o superando los problemas de principal-agente tan habituales en este campo.

Por último, no es posible finalizar esta sección sin mencionar las políticas en el ámbito del transporte: por su naturaleza energética y por sus efectos indirectos sobre el sistema energético. En este caso, las conclusiones a medio plazo no son obvias y se basan en el análisis prospectivo de Proost y Van Dender (2010). Así, el cambio modal a gran escala (a favor del ferrocarril o transporte marítimo) solo es recomendable en casos de grandes densidades poblacionales. Además, la electrificación del transporte, hipótesis básica de buena parte de los análisis prospectivos anteriores, puede tener una penetración más lenta de la prevista hasta 2050. Aunque a primera vista esto podría dificultar la consecución de sociedades altamente descarbonizadas a mediados de siglo, aún existe un gran margen para la mejora en la eficiencia energética de los vehículos. Es posible imaginar así aumentos de eficiencia de hasta un 50% sobre la situación actual, que darían continuación a los progresos observados en los dos últimos decenios y dificultarían la maduración y extensión a gran escala de los vehículos eléctricos. En cualquier caso, sería imprescindible diseñar los mecanismos que evitasen la aparición de efectos rebote que actuasen contra las anteriores ganancias de eficiencia.

5. Conclusiones

Este informe se ha ocupado de apuntar las principales consecuencias de los futuros acuerdos y políticas climáticas sobre el sistema energético mundial, por tanto adoptando una perspectiva global y de largo plazo. Aunque parto de las dificultades para alcanzar acuerdos internacionales para reducir las emisiones de GEI, asumo la introducción de medidas que garanticen que la temperatura media no traspase el umbral de aumento de 2°C. El objetivo es ambicioso tanto por la fuerte inercia causada por las emisiones de GEI hasta el momento como por la íntima relación entre cambio climático y energía (por lo que los efectos de las estrategias correctoras en este ámbito tendrán un gran alcance). De hecho, en el largo plazo habrá de producirse una fuerte descarbonización del sector energético que solo será posible con un radical cambio tecnológico. Pero para ello serán necesarias políticas estables e intensas que favorezcan este proceso y que sean viables desde una perspectiva socio-económica y aplicables administrativa y políticamente en la práctica. Estrategias de mitigación que, como el reciente WEO2011 pone de manifiesto, no se están cumpliendo, lo que nos sitúa en una senda de crecimiento de temperatura que se encuentra lejos de los 2°C.

Asumiendo acción para reducir las emisiones de GEI y mantenerse en unos objetivos de calentamiento en torno a los 2°C, en el informe he puesto de manifiesto que hay una coincidencia esencial entre los principales análisis prospectivos del sistema energético a mediados de siglo, llevados a cabo por la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC) y el servicio de estudios económico-tecnológico de la Comisión Europea (JRC). En todos los casos se prevé una creciente tendencia a la electrificación de las economías futuras, que coincide con una fuerte descarbonización de esta industria: fundamentalmente a través de un papel central de las energías renovables y, en menor medida, de la energía nuclear. Este fenómeno, sin embargo, no implica la desaparición del uso de los combustibles fósiles sino su menor peso relativo en el sistema energético y la adopción a gran escala de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Además, en todos los análisis prospectivos precedentes, la eficiencia energética es crucial para conseguir los objetivos climáticos establecidos en la cumbre de Cancún. Los anteriores estudios prospectivos asumen una fuerte involucración pública en la promoción de fuentes renovables que, junto a la existencia de un precio internacional sobre las emisiones de GEI, provocaría una mayor adopción de las tecnologías bajas en carbono. La promoción de renovables permitiría además conseguir objetivos no climáticos y un ahorro en los gastos en combustibles del sistema energético, lo que reduciría el coste de las inversiones adicionales sobre un escenario sin políticas.

El informe concluye avanzando las principales tendencias observadas en las políticas climáticas actuales y complementando la visión prospectiva con el análisis regulatorio de las políticas de eficiencia energética y de promoción de tecnologías bajas en GEI. Puesto que el informe ha sido encargado por una administración sub-central, hubo diversas referencias a la asignación jurisdiccional de las políticas climáticas de mitigación y adaptación. El informe puso también un

énfasis especial en los instrumentos de precio, ocupándose de sus efectos en términos de eficiencia energética, desarrollo tecnológico y coste-efectividad. La interacción de instrumentos, crucial para entender las complejas climáticas actuales (intra e inter jurisdiccionales) también se vio reflejada en este apartado, así como el diseño en contextos de segundo óptimo en los que conviven diversos objetivos y políticas.

En relación con las políticas específicas alineadas con los análisis prospectivos tecnológicos anteriores, el informe subrayó la necesidad de un diseño de los paquetes de promoción de renovables para que los objetivos se alcancen al mínimo coste posible. Esto implicaría distribuir de una manera óptima los recursos dedicados a la investigación básica y a la difusión de tecnologías, prestar una especial atención al diseño de los mecanismos de promoción y concentrarse en las tecnologías que pueden contribuir globalmente y de forma significativa a la reducción de las emisiones de GEI a costes asumibles. También se prestó atención a las políticas de eficiencia energética, apuntando a la necesaria combinación de instrumentos de precio con otras alternativas regulatorias, al suministro de información que reduzca los costes de transacción para los agentes, y a la superación de los problemas de principal-agente. Evitar uno de los problemas asociados a una mayor eficiencia energética, el efecto rebote, fue tratado específicamente en el caso de aumentos de eficiencia en el transporte convencional como alternativa a un cambio modal o de la flota de vehículos que lleve a una mayor electrificación.

Fuentes bibliográficas

- Borenstein, S. (2011) The private and public economics of renewable electricity generation WP 221, Energy Institute at Haas.
- Convery, F.J. (2011) Reflections: Energy efficiency literature for those in the policy process. *Review of Environmental Economics and Policy*, 5, págs. 172-191.
- 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, págs. 2066-2077.
- Herold, J., Von Hirschhausen, C. (2010) Carbon capture, transport and storage in Europe: A problematic energy bridge to nowhere? Nota di Lavoro 156.2010, FEEM.
- Fouquet, R. (2010) The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy*, 38, págs. 6586-6596.
- IEA (2010) *Energy Technology Perspectives*. International Energy Agency, París.
- IEA (2011) *World Energy Outlook*. International Energy Agency, París.
- IPCC (2011) *Renewable Energy Source 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.
- Labandeira, X. (2011) Nuevos entornos para la fiscalidad energética. WP 06/2011, Economics for Energy.
- Linares, P., Labandeira, X. (2010) Energy efficiency. Economics and policy. *Journal of Economic Surveys*, 24, págs. 573-592.
- Meeus, L., Azevedo, I., Marcantonini, 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.
- Murray, B., Newell, R., Pizer, W. (2009) Balancing cost and emissions certainty: An allowance reserve for cap-and-trade. *Review of Environmental Economics and Policy*, 3, págs. 84-103.
- Newell, R.G. (2010) The role of markets and policies in delivering innovation for climate change mitigation. *Oxford Review of Economic Policy*, 26, págs. 253-269.
- Nordhaus, W. (2010) Designing a friendly space for technological change to slow global warming. *Energy Economics*, 33, págs. 665-673.
- Olmstead, S.M, Stavins, R.N. (2010) Three key elements of post-2012 international climate policy architecture. Nota di Lavoro 97.2010, FEEM.
- Prins, G. et al. (2010) A new direction for climate policy after the crash of 2009 (Hartwell Paper). Institute for Science, Innovation and Society, Oxford.
- Proost, S., Van Dender, K. (2010) What sustainable road transport future? Trends and policy options. Discussion paper 14/2010. Joint Transport Centre, OCDE.
- Tirole, J. (2009) Some economics of global warming. *Rivista di Politica Economica*, 11/12, págs. 9-41.