

## Resumen

Este artículo revisa las distintas visiones del futuro del sector energético publicadas por distintas organizaciones, tanto a nivel global como nacional. El alcance temporal de la mayoría de estos escenarios es a 2030 y 2050. El análisis aquí realizado trata de arrojar luz sobre aquellos aspectos clave que van a influir en las condiciones del sector energético español de cara a la definición de su estrategia a largo plazo, y también a un mejor entendimiento de los grandes retos y oportunidades del sector energético a futuro.

*Palabras clave:* escenarios energéticos, planificación energética, transición energética, sector energético español, cambio climático.

## Abstract

This article reviews the different visions of the future of the energy sector published by different organizations, both globally and nationally. The time scope of most of these scenarios is 2030 and 2050. The analysis carried out here tries to highlight those key aspects that are going to influence the conditions of the Spanish energy sector. It is essential for the definition of long-term strategies and a better understanding of the great challenges and opportunities of the energy sector in the future.

*Keywords:* energy scenarios, energy planning, energy transition, Spanish energy sector, climate change.

*JEL classification:* N70, O13, Q40.

# ANÁLISIS DE ESCENARIOS ENERGÉTICOS PARA ESPAÑA

Antonio F. RODRÍGUEZ MATAS

Pedro LINARES LLAMAS

*Instituto de Investigación Tecnológica (Universidad Pontificia Comillas)*

## I. INTRODUCCIÓN

La planificación energética no es una tarea sencilla. El largo plazo de las inversiones asociadas a estos negocios, fundamentalmente infraestructuras con una elevada vida útil y alto coste inicial, se enfrenta a una creciente incertidumbre desde el lado de la demanda de energía. Y la complejidad está aumentando en los últimos tiempos, fundamentalmente debido a dos aspectos.

Por un lado, la necesidad de limitar las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera que obliga a descarbonizar paulatinamente el suministro energético, está impulsando el desarrollo de nuevas fuentes bajas en carbono. Así, la creciente competitividad de las energías renovables, en particular la energía eólica y la energía solar, puede crear un cambio radical tanto en la contribución de las fuentes energéticas convencionales como en la configuración de las redes de electricidad y gas necesarias para transportarlas.

Por otro lado, los desarrollos tecnológicos en el lado de la demanda de energía (entre los que se pueden señalar la creciente urbanización, digitalización y electrificación de nuestras economías, el uso de nuevos vectores energéticos como el hidrógeno o el almacenamiento, o el aumento de la eficiencia ener-

gética), así como los cambios de conducta de los consumidores o los desplazamientos en el peso económico de los distintos países, también pueden resultar en cambios disruptivos en los sistemas tradicionales.

Evidentemente, en los dos aspectos citados influirá también el desarrollo de la política nacional, regional o incluso de nivel global, que condicionará en gran medida las posibilidades de los cambios mencionados.

Y todo ello, en un contexto en el que las interrelaciones entre sectores, mediadas de forma creciente por el cambio climático, pueden ser cada vez más relevantes (un buen ejemplo es el nexo agua-energía-alimentación), haciendo de esta forma cada vez más complejo el análisis de la oferta y la demanda de energía a medio y largo plazo.

Cuando se combinan todos estos elementos en forma de escenarios coherentes para el futuro, podemos encontrarnos situaciones drásticamente distintas, ya adelantadas por distintas voces. Desde escenarios de abundancia energética basada en las energías fósiles con captura de CO<sub>2</sub>, hasta otros de descarbonización profunda de nuestras economías basada en fuentes renovables. Desde situaciones de gran aumento del bienestar global, hasta otras de estancamiento económico y vuelta a políti-

cas de aislamiento y de bloques. Desde modelos de negocio para la energía totalmente centralizados a otros completamente distribuidos. Evidentemente, cada uno de estos escenarios tiene consecuencias radicalmente distintas para el sector energético.

Y el problema es que no sabemos cuál de todos los escenarios posibles ocurrirá finalmente. Porque, como ya nos decía sir Karl Popper, es imposible predecir el futuro: «*for strictly logical reasons, it is impossible for us to predict the future course of history*». Pero podemos prepararnos para los futuros que vengan, diseñando estrategias robustas y flexibles frente a los cambios, tanto esperados como inesperados, que se producen cada vez más rápidamente en nuestras sociedades y organizaciones.

Este trabajo tiene como objetivo recopilar las distintas visiones del futuro del sector energético publicadas por distintas organizaciones, tanto a nivel global como nacional. El alcance temporal de la mayoría de estos escenarios es a 2030 y 2050, lo que permite tener un equilibrio entre el realismo impuesto por las inversiones y tecnologías existentes y las posibilidades, más inciertas, que se abren a más largo plazo. En cuanto al ámbito geográfico, en primer lugar, se incluye una serie de escenarios globales, lo que permite obtener un entendimiento generalizado del sector energético a nivel mundial. Esto es imprescindible, dado que los mercados energéticos tienen dinámicas que solo pueden explicarse a escala global. Posteriormente, por el interés de conocer las particularidades del sector a nivel nacional, se incluye a España como caso de estudio en detalle.

Confiamos en que el análisis aquí realizado contribuya a arrojar luz sobre aquellos aspectos clave que van a influir en las condiciones del sector energético español de cara a la definición de su estrategia a largo plazo, y también a un mejor entendimiento por parte de la sociedad de los grandes retos y oportunidades del sector energético a futuro.

## II. ANÁLISIS DE ESCENARIOS GLOBALES PARA EL SECTOR ENERGÉTICO

Muchas empresas e instituciones realizan ejercicios de prospectiva, con carácter anual o plurianual, con fines similares: prepararse para el futuro (o ayudar a otras compañías a ello). En esta sección presentamos, de forma muy resumida, las conclusiones de los estudios públicos más conocidos y con mayor prestigio en el sector energético: los de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), Shell, BP, Bloomberg New Energy Finance, e IHS-CERA. Todos ellos estudios muy rigurosos, por supuesto, pero que parten de distintos supuestos y filosofías, y que, por tanto, resultan en escenarios no siempre comparables.

### 1. *World Energy Outlook 2021 (WEO)*, Agencia Internacional de la Energía (IEA)

El informe anual de la agencia, una referencia indiscutible en el sector energético mundial, plantea cuatro escenarios. Son dos escenarios convencionales o tendenciales y dos escenarios más transformadores: *SDS*, de desarrollo sostenible compatible con el Acuerdo de París, y

*NZE2050*, en el que se analiza la factibilidad de alcanzar una economía global neutra en carbono para 2050. El informe de 2021 se formuló especialmente enfocado en proporcionar asistencia a los decisores políticos de cara a la Conferencia de las Partes (COP26, UNFCCC), para entender mejor los puntos clave de la transición energética.

— *Stated Policies Scenario (STEPS)*: Este escenario tiene en cuenta políticas y objetivos ya comprometidos, en tanto que estén respaldados por medidas ya concretadas para su realización.

— *Announced Pledges Scenario (APS)*: Este escenario asume que los compromisos adquiridos por todos los Gobiernos del mundo, incluyendo las contribuciones nacionales determinadas (*NDC*, por sus siglas en inglés), se cumplen en los tiempos acordados. Este informe es el primero en el que la IEA incluye un escenario similar.

— *Sustainable Development Scenario (SDS)*: Se trata de un escenario similar al de informes anteriores, que dibuja el camino hacia la consecución de los objetivos energéticos de desarrollo sostenible, incluido el Acuerdo de París, es decir, mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C en 2100. Su elaboración, al contrario que los dos escenarios anteriores, no es fruto de un ejercicio de *forecasting*, sino de *backcasting*. Es decir, primero se fija el objetivo final, y luego se dibuja el camino para llegar hasta él.

— *Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE2050)*: Este escenario fija el objetivo de al-

canzar una economía global neutra en carbono en 2050, por lo que el planteamiento es similar al *SDS*, aunque más ambicioso en términos de reducción de emisiones.

Las hipótesis macro que definen los escenarios convencionales suponen un crecimiento económico global del 3 por 100 cada año. Estas condiciones económicas se mantienen constantes en todos los escenarios, de forma que se pueden comparar directamente los efectos de las políticas climáticas y energéticas, aislándolas de las variaciones macroeconómicas.

En cuanto al efecto de la pandemia, el informe de 2020 dibujaba diferentes escenarios de recuperación, en los que la demanda energética global alcanzaría niveles prepandémicos a principios de 2023 para el escenario

*STEPS* y en 2025 para el escenario de recuperación demorada (*DRS*, por sus siglas en inglés), que era más pesimista con la gestión de la pandemia. Un año después, el *WEO 2021* contrasta que la realidad ha sido una mezcla de esos escenarios: la mayoría de los países desarrollados goza de buenos indicadores de vacunación y sus economías vivieron un efecto rebote en el que el crecimiento económico se impuso con fuerza hasta el inicio de la guerra de Ucrania. Este informe es anterior al inicio de la invasión rusa, por lo que no se incluye en su análisis. Por otra parte, muchos países en desarrollo aún tienen difícil acceso a las vacunas y sus economías siguen estancadas, con fuertes restricciones y/o problemas graves de salud pública.

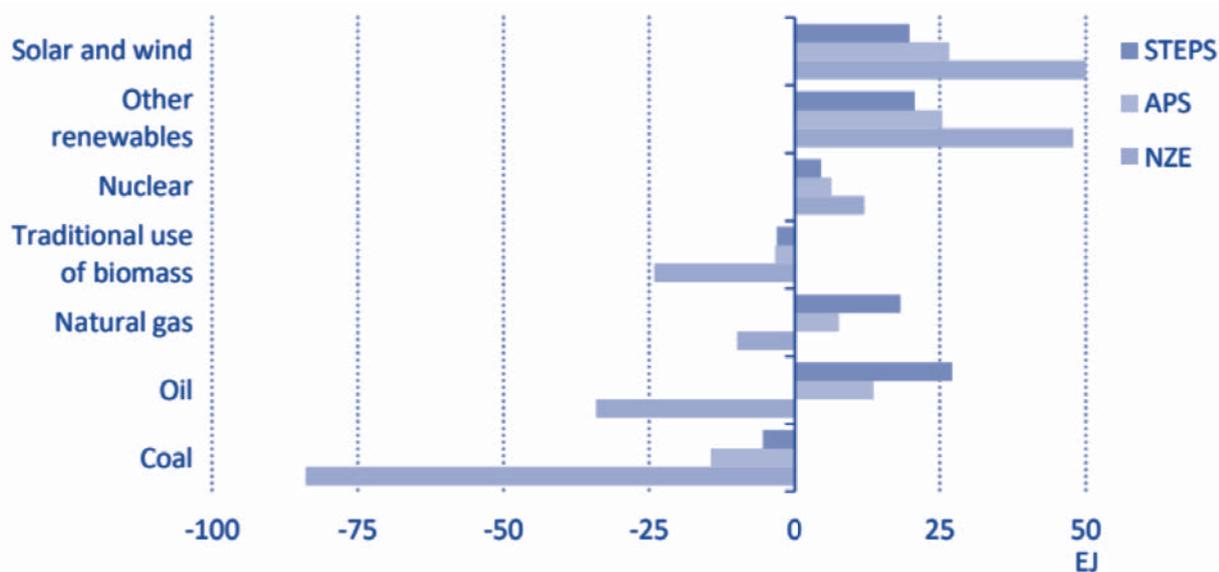
La demanda de energía varía según cada escenario. El crecimiento anual es de 1,3 por

100 hasta alcanzar los 670 EJ en 2030 en el escenario *STEPS*, mientras que el *APS* crece un 1 por 100, alcanzando los 650 EJ ese mismo año. Por el contrario, el escenario *NZE* supone una disminución de la demanda en un 0,7 por 100 anual, hasta los 550 EJ en 2030. Por supuesto, las variaciones de la demanda también afectan al suministro de los combustibles según cada escenario, habiendo una mayor variación a favor de las renovables y de reducción de los combustibles fósiles en el escenario *NZE*.

En cuanto a los efectos distributivos, existen desafíos de gran magnitud que deben abordarse. Se ha roto la tendencia de progreso hacia un acceso universal a la electricidad y a formas limpias de cocina que existía antes de la pandemia. El número de personas sin acceso a la electricidad ha aumentado en un 2 por 100 en

GRÁFICO 1

## CAMBIO EN EL SUMINISTRO TOTAL DE ENERGÍA GLOBAL POR COMBUSTIBLE Y ESCENARIO, 2020-2030



IEA. All rights reserved.

Fuentes: World Energy Outlook 2021 (IEA).

2021. Casi todo el incremento ha tenido lugar en el África subsahariana. El informe indica la necesidad de que se acelere el flujo de capital para ayudar a los países en desarrollo para que acometan su transición energética.

En cuanto a la producción de energía eléctrica, las fuentes renovables, principalmente la eólica y solar fotovoltaica, crecen rápidamente, al igual que los vehículos eléctricos, cuyas ventas marcaron un nuevo récord en 2020 pese a la pandemia. En su proyección a futuro, la energía solar se convertiría en la fuente de generación eléctrica más importante, creciendo fuertemente en todos los escenarios planteados, gracias a incentivos políticos y a la maduración de esta tecnología: en la mayoría de los países, la energía solar fotovoltaica ya es más asequible que las nuevas plantas de carbón o gas. Aun así, la energía hidráulica seguiría siendo la mayor fuente de energía renovable, siendo la solar el principal vector de crecimiento, seguido por la eólica *onshore* y *offshore*. El almacenamiento juega un papel fundamental para garantizar la flexibilidad de la operación en el sector eléctrico.

El sector eléctrico es importante para la descarbonización, pero no es el único. Reducir las emisiones de la generación eléctrica parece alcanzable, y la electrificación de algunos sectores es una solución efectiva en costes. Sin embargo, otros sectores como la industria del acero o del cemento, así como el transporte de larga distancia, tienen importantes desafíos para la descarbonización, entre otros. Seguir reduciendo las emisiones más allá de 2030 requerirá enfocarse en mejorar

la eficiencia energética y de materiales, la electrificación, y el papel de los gases y combustibles renovables.

La demanda global de carbón cae en todos los escenarios, aunque la rapidez de abandono de dicho combustible en la generación eléctrica es la que marca la diferencia entre la disminución a 2030 del 10 por 100 en el escenario *APS*, y del 55 por 100 en el escenario *NZE*. Hay que considerar que un tercio de toda la generación eléctrica global se basó en este combustible en 2020. Sin embargo, el anuncio de China de abandonar la construcción de plantas de carbón en el extranjero es un signo positivo: cancelaría 190 GW proyectados, que se trasladaría a un ahorro de 20 Gt de CO<sub>2</sub>e, equivalente a todas las emisiones necesarias para convertir a la UE en una economía con emisiones netas cero en 2050. Aun así, hace falta una gran acción política para que el abandono del carbón sea efectivo a nivel global, así como para que la transición sea justa, apoyando a los sectores más perjudicados por la pérdida de trabajos y riqueza.

En cuanto al gas natural, su demanda se incrementa en todos los escenarios en los próximos cinco años, aunque después de este período existen divergencias importantes según el escenario.

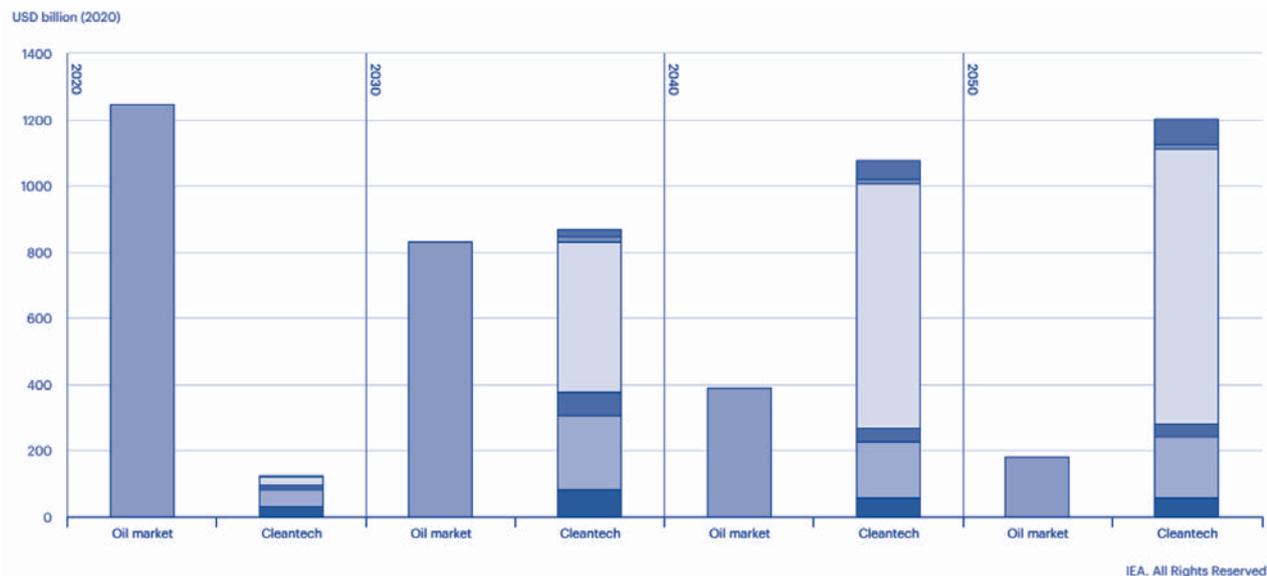
Por otra parte, es la primera vez que un informe *WEO* estima que la demanda de crudo caerá en todos los escenarios contemplados, aunque varía mucho el plazo y velocidad. En el escenario *STEPS*, el pico de demanda se alcanza a mediados de la década de 2030, y su declinar es muy gradual. En *APS*, el pico se alcanza poco después del 2025, y se reduce su consumo hasta los

75 millones de barriles al día en 2050. Para alcanzar el escenario *NZE*, el consumo de crudo debe caer hasta los 25 millones de barriles al día en 2050.

El informe del año pasado, el *WEO 2020*, destacaba la presión que existía sobre los productores de crudo y gas a lo largo del mundo como consecuencia de la pandemia, que contrajo notablemente el consumo: la caída de precios y la revisión a la baja de la demanda había provocado que se recortara una cuarta parte del valor total de la futura producción de crudo y gas. Sin embargo, el informe de este año, el *WEO 2021*, destaca que la transición energética puede provocar tensiones en los mercados energéticos que genere picos en los precios de los combustibles que sufrirán los consumidores. Además, y como mencionábamos anteriormente, este informe fue escrito antes de la invasión rusa y, por tanto, el aumento de precios de los combustibles fósiles es ahora uno de los problemas vigentes de mayor magnitud que afronta la Unión Europea. En escenarios como el *NZE*, los hogares son menos dependientes de los combustibles fósiles, gracias a la mejora de eficiencia energética, la movilidad eléctrica y el abandono de calderas de gas. Por este motivo, el *shock* en precios en 2030 es un 30 por 100 menor en el escenario *NZE* que en el *STEPS*.

El informe destaca la oportunidad de negocio que se abre con la «nueva economía de la energía». Por poner algunos números, en el escenario *NZE*, la oportunidad de mercado anual supera el billón de dólares en 2050, teniendo en cuenta la fabricación de turbinas eólicas, paneles solares, baterías

GRÁFICO 2

TAMAÑOS DE MERCADO ESTIMADOS DE PETRÓLEO Y EQUIPOS SELECCIONADOS DE TECNOLOGÍA DE ENERGÍA LIMPIA EN EL ESCENARIO *NET ZERO*, 2020-2050

Fuentes: *World Energy Outlook 2021* (IEA).

de litio, electrolizadores y pilas de combustible. Por tanto, el impulso económico de la transición será una oportunidad equivalente a lo que representa actualmente el mercado petrolero mundial.

También se destaca que todos los agentes deben participar y contribuir para conseguir una economía neutra en carbono: Gobiernos, compañías energéticas, inversores y ciudadanos. Sin embargo, los Gobiernos tienen un papel decisivo para actuar y guiar las acciones del resto de la sociedad.

## 2. BP Energy Outlook 2020

Considera tres escenarios a 2050, lo cual es un cambio importante con respecto a años anteriores y que permite compararlo con otros informes como el *WEO*:

— *Rapid Transition Scenario (Rapid)*: Este escenario contempla una serie de políticas que incrementan el precio del carbono e implementan medidas concretas en ciertos sectores (industria, edificios y transporte), de forma que las emisiones procedentes del sector energético caigan en torno a un 70 por 100 para 2050, enfocadas en alcanzar el objetivo de limitar el calentamiento global en 2 °C para 2100.

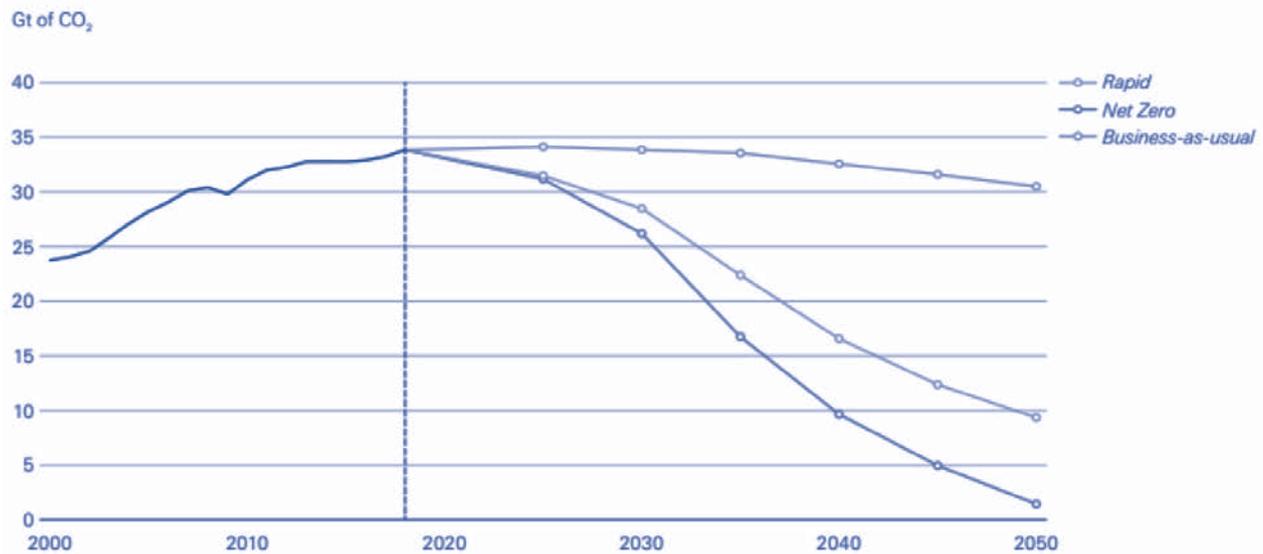
— *Net Zero Scenario (Net Zero)*: Se asumen las mismas políticas que en el escenario *Rapid*, pero además se incluyen fuertes cambios en el comportamiento social, lo que aceleraría fuertemente la reducción de emisiones. Las emisiones caerían más de un 95 por 100 para 2050, siendo un escenario consistente con el objetivo de contener el calentamiento global por debajo de 1,5 °C.

— *Business-as-usual Scenario (BAU)*: Este escenario plantea que las políticas públicas, la tecnología y el comportamiento social siguen evolucionando al mismo ritmo que en el pasado reciente. Esto llevaría a alcanzar un pico de emisiones a mediados de la década del 2020, pero la reducción sería lenta, reduciendo tan solo en un 10 por 100 las emisiones en 2050 con respecto a los niveles de 2018.

Atendiendo a los datos macro, el crecimiento de la demanda de energía primaria difiere mucho entre el escenario *BAU*, del 25 por 100, y los escenarios *Rapid* y *Net Zero*, del 10 por 100. En todos los casos, el crecimiento está asociado a los países emergentes.

La cuota de las energías fósiles en el *BAU* desciende hasta

GRÁFICO 3  
EMISIONES DE CO<sub>2</sub> POR ESCENARIO



Fuentes: Energy Outlook, 2020 (BP).

el 65 por 100 (reducción mayor que en *BAU* previos, que mantenían un 75 por 100), mientras que en *Net Zero* bajan hasta el 20 por 100, por lo que no desaparecen del todo.

En el escenario *BAU*, el carbón y el petróleo caen mucho, especialmente el primero, que casi desaparece en 2050. En el caso del petróleo, el transporte es el principal responsable de su bajada. El pico de la demanda se produce a finales de la década de 2020, aunque indican que sigue haciendo falta importantes inversiones para sostener esa demanda creciente.

El gas se mantiene más estable, tanto en cuota como en valor absoluto, mientras que la energía nuclear e hidroeléctrica crecen, la primera principalmente en China y la segunda tanto en China como en Sudamérica y resto de Asia. Para el gas se supone bastante *CCUS* (captu-

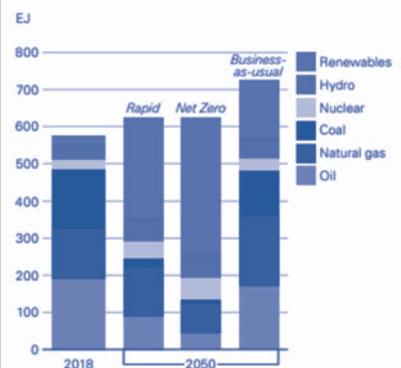
ra, uso y almacenamiento de carbono), siendo un 40 por 100 en *Rapid* y 75 por 100 en *Net Zero*, con una parte destinada a hidrógeno azul, especialmente importante en *Net Zero*. El gas destinado a producción eléctrica cae mucho en los dos escenarios de descarbonización, ya que aumentan mucho las renovables.

Las renovables aumentan notablemente en los escenarios de descarbonización, a partes iguales entre solar fotovoltaica y eólica, siendo la reducción de costes de un 25 por 100 para eólica y un 60 por 100 para fotovoltaica. La biomasa también crece mucho en importancia, especialmente los biocombustibles para aviación.

Una de las claves de los escenarios *Rapid* y *Net Zero* es el precio del CO<sub>2</sub> en 2050 que suponen, diferenciando entre los 250 US\$/tCO<sub>2</sub> en los países avanzados y los 175 US\$/tCO<sub>2</sub> en las economías

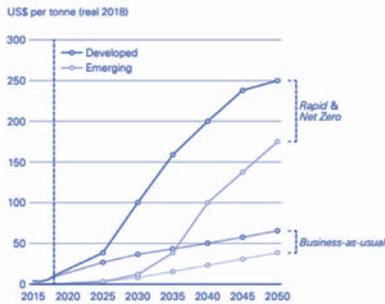
emergentes. Esto implica grandes incentivos para la eficiencia energética y uso de fuentes energéticas no emisoras. Este impulso es mucho menor en el *BAU*, donde se alcanzan precios del CO<sub>2</sub> de tan solo 65 US\$/tCO<sub>2</sub> en economías avanzadas y 35 US\$/tCO<sub>2</sub> en economías en desarrollo en 2050.

GRÁFICO 4  
CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA



Fuentes: Energy Outlook, 2020 (BP).

GRÁFICO 5  
PRECIO MEDIO DE  
LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EN LAS  
REGIONES DESARROLLADAS  
Y EMERGENTES



Fuentes: Energy Outlook, 2020 (BP).

El escenario *Net Zero* plantea que la transición energética tiene importantes limitaciones económicas y políticas si solo se apoya en políticas públicas. Para alcanzar cambios más profundos hacen falta cambios de comportamiento de ciudadanos y empresas, implementando mecanismos de economía circular, economía compartida, propensión al cambio hacia energías renovables y menor resistencia a la construcción de tecnologías bajas en emisiones.

El escenario *Rapid* lleva a un cambio importante desde los hidrocarburos tradicionales (crudo, carbón y gas natural) a fuentes no emisoras, principalmente renovables. De esta forma, a principios de la década de 2040 las fuentes de energía no fósiles ya supondrán la mayor parte de la energía global. Además, el *mix* energético estará mucho más diversificado que ahora. Tras el dominio histórico del carbón, y más tarde del crudo, ahora parece que las cuotas de las diferentes fuentes energéticas estarán mucho más repartidas. Esto significa que el *mix* energético dejará de estar asociado a la dis-

ponibilidad, y pasará a depender de las preferencias de los consumidores. Esta mayor diversificación hará que exista mayor competencia por las cuotas de mercado frente al estancamiento de la demanda, lo que trasladará rentas de los productores a los consumidores finales.

Por otra parte, la electrificación y el hidrógeno adquieren mucha importancia en el consumo de energía final en el escenario *Rapid*, lo que llevará a los mercados energéticos a ser más locales por el mayor coste de transporte de estos vectores energéticos.

Finalmente, el informe incluye un último escenario alternativo llamado *Delayed and Disorderly*, que consiste en considerar que los cambios rápidos en las políticas y en los comportamientos que se producen en los escenarios *Rapid* y *Net Zero* se atrasan. De esta forma, el sistema energético mundial se supone que sigue la evolución del escenario *BAU* hasta 2030, momento en el que se toman las acciones necesarias para que las emisiones acumuladas sean similares al escenario *Rapid* en el período 2018-2050.

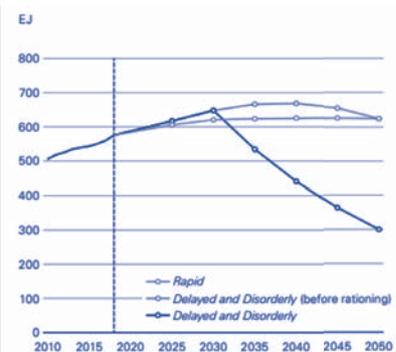
Este escenario se basa en el supuesto de que los retrasos en las acciones suponen costes. En concreto, el modelo asume que no es posible superar las mejoras en eficiencia energética o en el cambio de combustibles en comparación con el escenario *Rapid* en 2050. De esta forma, suponen que, para el período 2030-2050, el grado de eficiencia energética y la intensidad de carbono del *mix* de combustibles mejoran linealmente, alcanzando los mismos niveles que el escenario *Rapid* en 2050.

Dadas estas restricciones en la eficiencia energética y el cambio de combustibles, el resto de las medidas adicionales necesarias para alcanzar el objetivo de emisiones acumuladas consisten en el racionamiento de la energía, es decir, restringiendo la actividad energética. Este racionamiento se impone de forma proporcional a los sectores de la economía.

Los resultados de este escenario muestran que un retraso como este supone costes adicionales muy significativos, obligando a desviar una parte importante de la inversión en otras actividades económicas, y teniendo que dismantelar prematuramente activos productivos. Además, el racionamiento necesario equivale a una cuarta parte del consumo total de energía durante el período 2030-2050.

Analizando lo que supondría este racionamiento por sectores, el resultado es que se perdería el crecimiento de la producción industrial durante veinte años. En transporte, se reduciría a dos tercios la actividad de los coches de pasajeros y a la mitad la aviación, en comparación con

GRÁFICO 6  
CONSUMO DE ENERGÍA  
PRIMARIA



Fuentes: Energy Outlook, 2020 (BP).

los niveles del escenario *Rapid* en 2050, además de reducciones similares en el transporte marítimo. En el sector edificios, la reducción sería equivalente a la energía que utiliza este sector en la Unión Europea actualmente. Además, como resultado de todo ello, y aunque este escenario no lo haya analizado, se podrían esperar fuertes impactos en los niveles de bienestar.

### 3. *The Energy Transformation Scenarios (2021)*, Shell

La compañía Shell ha venido publicando escenarios energéticos de largo plazo durante más de cuarenta años, siendo una de las principales referencias mundiales en este ámbito. El último informe completo de escenarios fue publicado en 2021, bajo el nombre *The Energy Transformation Scenarios*, que incluye tres escenarios denominados *Waves*, *Islands* y *Sky 1.5*.

Su objetivo no es «acertar» el futuro más probable, sino incitar a la reflexión acerca de estrategias de negocio robustas ante un amplio rango de escenarios posibles. En todos los casos, el horizonte temporal contemplado es 2020-2100, analizando especialmente la salida de la crisis provocada por la pandemia desde 2020.

Las principales premisas de partida de cada escenario son las siguientes:

— *Waves (late, but fast decarbonization)*: Este escenario corresponde a una salida de la pandemia en la que se prioriza el crecimiento económico a la seguridad sanitaria, por lo que la recuperación económica será

rápida, pero con repetidas olas de infección. Es previsible un crecimiento de la desigualdad y del descontento social, así como de la ocurrencia de eventos climáticos extremos. En cuanto al sector energético, habrá una rápida implementación de medidas para reducir el uso de energías fósiles. El uso global de carbón y crudo alcanzan su pico en la década de 2030, y poco después el gas natural. Se alcanza la neutralidad en carbono en el 2100 y el aumento de temperatura será de 2,3 °C.

— *Islands (late and slow decarbonization)*: En este escenario, la salida a la crisis de la pandemia se hace optando por criterios de seguridad, en los que el nacionalismo tiene mucho peso. Existe una mentalidad de isla buscando objetivos de autonomía y autosuficiencia. Se generan conflictos en el comercio internacional y la colaboración entre países, por lo que la economía mundial se estanca y los esfuerzos internacionales para hacer frente al cambio climático se ralentizan. La búsqueda cortoplacista del crecimiento económico hace que las economías se mantengan dependientes de las fuentes fósiles baratas, y las emisiones solo se reducen muy lentamente. El curso normal de sustitución de equipos e infraestructuras traen tecnologías más limpias, alcanzando la neutralidad en carbono más allá de 2100, con un aumento de la temperatura en 2,5 °C para este año y que seguirá aumentando.

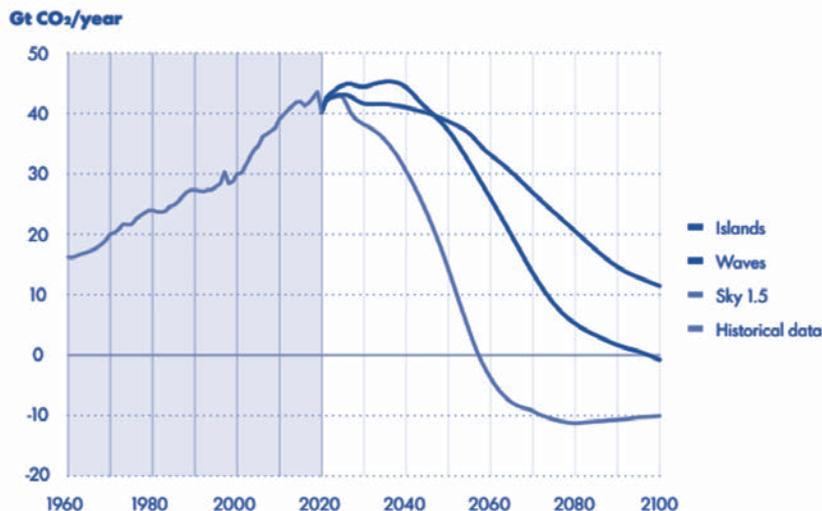
— *Sky 1.5 (fast decarbonization now)*: Este escenario contempla una primera respuesta a

la pandemia centrada en el bienestar público y la seguridad sanitaria. Los esfuerzos de colaboración y competencia internacional de las comunidades científicas y médicas en el desarrollo de vacunas hacen que se aprecie en mayor medida el valor de abordar los grandes desafíos conjuntamente. Países con una industria tecnológica fuerte, como China o Estados Unidos, se centran en el desarrollo de tecnologías más limpias como impulso a sus economías domésticas y su competitividad tecnológica. Hay una rápida electrificación de la economía global, con un gran dominio de fuentes renovables. La demanda de crudo y carbón alcanzan su pico en la década de 2020, y el gas natural en la década siguiente. En los sectores más difíciles de electrificar, los combustibles líquidos y gaseosos se descarbonizan progresivamente con biocombustibles e hidrógeno. En este escenario, las economías avanzadas alcanzan la neutralidad en 2050, y el aumento de temperatura se contiene en 1,5 °C.

Este informe considera que la economía global será mucho más eficiente energéticamente, pero el consumo energético aún seguirá aumentando, obteniendo ratios de crecimiento económico dos o tres veces mayor que el aumento de demanda energética.

En todos los escenarios se llegan a controlar las emisiones globales, la clave es el momento en el que eso ocurre. En el escenario *Sky 1.5*, se alcanzan emisiones netas cero en 2050, mientras que en los otros dos

GRÁFICO 7  
EMISIONES DE CO<sub>2</sub> POR ESCENARIO



Fuentes: *The Energy Transformation Scenarios, 2021* (Shell).

CUADRO N.º 1

OBJETIVOS INTERMEDIOS DE DESCARBONIZACIÓN POR ESCENARIO

	SKY 1.5	WAVES	ISLANDS
Peak coal	2014	2031	2028
Peak oil	2025	2037	2037
Peak natural gas	2034	2043	2046
30% electrification of global economy	2035	2046	2066
50% electrification of global economy	2061	2080	>2100
20% of electricity from solar and wind	2029	2031	2035
50% of electricity from solar and wind	2043	2053	2068
20% of passenger vehicle km on electricity	2030	2042	2068
50% of passenger vehicle km on electricity	2046	2059	2086
10% of passenger aviation demand on hydrogen	2082	2057	>2100
20% of passenger aviation demand on hydrogen	2095	2066	>2100
50% CO <sub>2</sub> emissions reduction vs 2019	2046	2064	2078
Net-zero total CO <sub>2</sub> emissions	2058	2098	>>2100

Fuente: *The Energy Transformation Scenarios, 2021* (Shell).

escenarios eso no ocurre hasta 2100 o más allá. Las implicaciones para el calentamiento global son importantes, pudiendo contener el aumento de temperatura en la década de 2060, o por el contrario que continúe creciendo incluso durante el siguiente siglo.

En cuanto a las tecnologías necesarias para la descarbonización, el peso de la energía solar y eólica varía según el escenario, aunque son importantes en todos ellos, así como el uso de biocombustibles. Destaca que el hidrógeno tiene mucho más peso en el escenario *Wave* que en el *Sky*

1.5, siendo prácticamente irrelevante en el escenario *Islands*. Se concede mucha importancia a los sumideros, tanto naturales como de captura y almacenamiento. Con respecto a este último, el informe señala que es una tecnología imprescindible para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, aunque el carbono utilizable en la manufactura de productos es mucho menor que el capturado, por lo que parece un desafío importante resolver su uso o almacenamiento.

Por último, las inversiones para producción de crudo y gas siguen siendo necesarias en todos los escenarios considerados, aunque vayan reduciéndose con el tiempo. Especialmente la demanda de gas natural parece bastante robusta durante toda la década de 2020, aunque tras este período existe grandes incertidumbres al respecto.

#### 4. New Energy Outlook 2021, Bloomberg New Energy Finance

Bloomberg NEF ha seguido la misma tendencia que la mayoría de los informes globales, los cuales han planteado algún escenario *Net Zero* para 2050. Sin embargo, este informe va más allá y todos los escenarios planteados son *Net Zero* para el mismo período. Esto aporta gran utilidad al análisis, ya que se plantean diferentes caminos para alcanzar el mismo objetivo. Esto hace que los escenarios sean directamente comparables entre sí, pudiendo poner el foco en diferencias de costes, disponibilidad de tecnologías, despliegue de inversiones, etc.

Los tres escenarios comparten características similares, como una importante electrificación y

despliegue de energías renovables, pero plantean algunas diferencias notables, principalmente en el uso de diferentes tipos de hidrógeno y de tecnologías de descarbonización:

- *Green Scenario*: Este escenario se apoya en el uso de electricidad sin emisiones e hidrógeno verde, que se produce con electrolizadoras alimentadas por energía eólica y solar, y se destina a sectores como el industrial o el transporte pesado, así como a generación eléctrica para complementar la electrificación.
- *Gray Scenario*: Este escenario se apoya en la captura y almacenamiento de carbono. Además de una extensa electrificación y uso de fuentes renovables, algunos sectores se apoyan en la captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés) para descarbonizarse. También se utiliza bioenergía a gran escala, e hidrógeno azul en menor medida, producido con gas natural y CCS.
- *Red Scenario*: La energía nuclear es la piedra angular de este escenario. Sigue una trayectoria similar al escenario

*Green*, pero incluyendo energía nuclear como complemento de la eólica, solar y baterías en el sector eléctrico, y para la producción de hidrógeno rojo.

El análisis tiene en cuenta la evolución hasta 2050 para garantizar el cumplimiento con el presupuesto de carbono. La reducción de emisiones es limitada hasta 2030, a partir del cual se acelera hacia 2040 y 2050.

Los objetivos intermedios para 2030 están enfocados principalmente en la descarbonización del sector eléctrico, así como en una electrificación importante de edificios, transporte e industria. Para ello, en el escenario *Green*, el despliegue de renovables debe ser enorme, instalando cada año 5,2 veces más eólica, 3,2 veces más fotovoltaica y 26 veces más capacidad de baterías que en 2020. Además, las tasas de reciclado de algunos materiales deben crecer significativamente, especialmente la de aluminio, acero y plásticos.

El transporte necesitaría añadir 35 millones de vehículos eléctricos cada año, para alcanzar los 355 millones en 2030, lo que supondría aproximadamente un

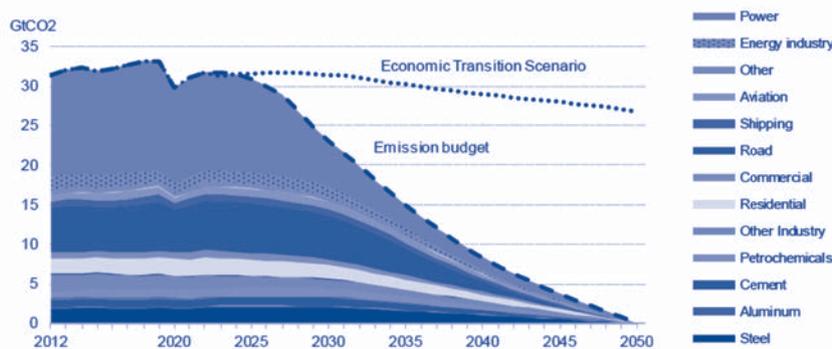
17 por 100 del parque mundial de vehículos (según la estimación de la IEA en la que habrá aproximadamente 2.000 millones de vehículos en el mundo), y así reducir en un 11 por 100 las emisiones con respecto a 2019. Los combustibles sostenibles en aviación necesitan incrementarse en un 18 por 100 con respecto al total consumido para 2030, y en transporte marítimo los biocombustibles deben alcanzar una cuota del 4 por 100 para la misma fecha. Los edificios necesitan instalar 18 millones de bombas de calor nuevas cada año hasta 2030.

Destacan el importante papel que jugará el despliegue del hidrógeno, la tecnología CCS y la energía nuclear durante esta década: en el escenario *Green*, casi 2 TW de electrolizadores deben instalarse para que el sector del hidrógeno despegue; en el escenario *Gray*, casi 1.000 Mt de captura y almacenamiento de carbono; y en el escenario *Red*, los pequeños reactores nucleares modulares empiezan a estar disponibles en 2027, y 390 MW deben haberse instalado para 2030. Sin estos objetivos intermedios a 2030, es difícil pensar que se puedan cumplir el resto de objetivos a 2040 y 2050.

En cuanto a los objetivos a 2050, estiman que la electrificación solo alcanzará el 50 por 100 de la energía final. El porcentaje de energía renovable en el sector eléctrico se situaría entre el 62 por 100 en el escenario *Gray* y el 84 por 100 en el *Green*. El gas vive un breve *boom*, mientras sustituye al carbón y no se despliega el hidrógeno, pero desaparece rápidamente después.

El transporte marítimo funciona con amoníaco, y la aviación

GRÁFICO 8  
PRESUPUESTO DE CARBONO PARA EL SECTOR ENERGÉTICO



Fuentes: *New Energy Outlook, 2021* (Bloomberg New Energy Finance).

con hidrógeno para distancias cortas, y biofuel para distancias largas. Además, asumen un gran potencial de eficiencia en los barcos.

En los edificios, la mayoría de la reducción viene de las bombas de calor, pero también hay un 12 por 100 que viene del hidrógeno, y un 20 por 100 de la biomasa.

En la industria, el reciclaje juega un papel relevante (un 10 por 100 de la reducción prevista, dos tercios de las reducciones en acero hasta 2030). La electrificación y el hidrógeno se ocupan del resto, salvo para el cemento, cuyas reducciones deben venir del CCS.

En cuanto al hidrógeno, estiman que un 40 por 100 de la producción irá al sector eléctrico, para almacenamiento, y luego a la industria (un 25 por 100 de la demanda total). El transporte (fundamentalmente la aviación) consumiría solo un 12 por 100 del hidrógeno.

Por último, indican que para lograr estos objetivos hay que doblar la inversión actual anual en infraestructuras energéticas durante las tres próximas décadas.

### 5. IHS Energy Scenarios and Net Zero Cases 2021, IHS-CERA

IHS-CERA es otra de las fuentes de referencia en el sector energético. En 2021 publicó un informe enfocado en la transición energética por parte de las empresas del sector y en su efecto en los mercados. Divide en cuatro categorías a los agentes que participan en la transición energética, centrándose en las

políticas, la regulación y las inversiones:

— *Gobiernos*: Su compromiso aumenta con las políticas para reducir las emisiones de forma acelerada: en 2021 ya tenían al 73 por 100 de las emisiones globales bajo planes y propuestas políticas climáticas.

— *Empresas*: Se están comprometiendo cada vez con mayor intensidad en la reducción de emisiones, tanto empresas energéticas como no energéticas.

— *Sector financiero*: Aumentan la presión en las empresas. Los inversores incorporan más criterios climáticos en la gestión de riesgos de su cartera, y exigen a las empresas que diseñen planes coherentes con los objetivos climáticos.

— *Activistas y accionistas*: Ganan resoluciones relacionadas con el cambio climático, cambian consejos de administración y demandan compañías, todo ello apoyado en que la reducción de emisiones es una cuestión de derechos humanos.

El estudio de IHS plantea tres escenarios a 2050:

— *Inflections*: Se trata del escenario base, e incluye los cambios sociales, políticos y de mercado que provocan los principales cambios en los mercados energéticos. Plantea que las empresas y los mercados son los principales actores en promover la inversión necesaria para la transición energética, dejando atrás a los Gobiernos pese a sus intenciones. La transición toma diferentes velocidades según la región del mundo.

— *Green Rules*: Se produce una fuerte reacción frente a la pandemia y los desastres del cambio climático. Se desencadena un cambio revolucionario hacia la transición energética, con la población exigiendo medidas de calado, aunque no se consiguen alcanzar todos los objetivos.

— *Discord*: Por último, este escenario plantea esencialmente una ralentización de la economía mundial tras el rebote de la recuperación de la pandemia, creando mucha incertidumbre en las inversiones del sector energético y fracasando en buena parte de la descarbonización mundial.

Además, incluyen otros dos escenarios *Net Zero* adicionales, también para 2050, aunque diferenciándose de los tres anteriores por ser un ejercicio de *back-casting*, es decir, analizan cómo son los caminos para alcanzar un objetivo final predeterminado. Una hipótesis importante de estos escenarios consiste en la incapacidad política para incidir en las emisiones globales hasta el año 2027, por lo que en los años posteriores hará falta un esfuerzo mayor para compensarlo. Los dos escenarios son los siguientes:

— *Accelerated Carbon Capture and Sequestration (ACCS)*: Se incluye un uso muy extendido de CCS para abatir las emisiones del sector energético e industrial. La captura de emisiones en 2050 debe ser equivalente a una cuarta parte de las emisiones actuales en el sector energético.

— *Multitech Mitigation (MTM)*: Consideran que se utiliza CCS, pero a pequeña escala, pero se apoyan en la diversificación

de la producción energética y en la electrificación de todos los sectores y economías, alimentadas por fuentes renovables.

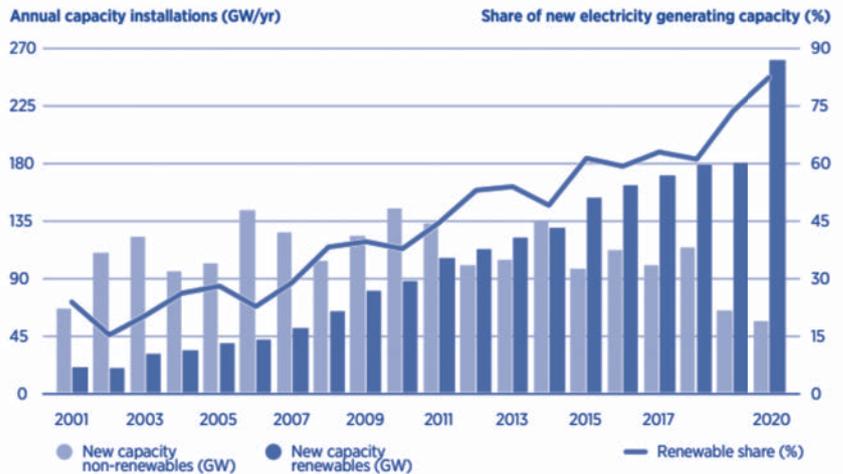
Todos los escenarios tienen diferentes implicaciones. En primer lugar, los escenarios *Discord* e *Inflections* llevarían a superar holgadamente el aumento máximo de temperatura propuesto en el Acuerdo de París, con 3,1 °C en el primero y 2,6 °C en el segundo. El escenario *Green Rules* haría aumentar en 1,9 °C la temperatura global, no muy por encima de los dos escenarios *Net Zero*, en los que se alcanza un aumento de 1,6 °C para el escenario *MTM* y 1,5 °C en *ACCS*. Además, los dos casos *Net Zero* suponen importantes emisiones negativas durante todo el período 2050-2100 para contener la temperatura.

## 6. World Energy Transitions Outlook (WETO): 1.5°C Pathway (2021), IRENA

IRENA es otra referencia en la elaboración de informes de prospectiva energética. Su último informe, publicado en 2021, se centra en la forma de alcanzar el objetivo de 1,5 °C del Acuerdo de París, examinando sus implicaciones políticas y socioeconómicas.

En primer lugar, analiza los pasos que ya se han dado en la transición energética y la importancia de las energías renovables en este proceso: resalta la dominancia de las renovables en los últimos años, cuya capacidad instalada en los últimos siete años supera a la suma de nuclear y fósil, alcanzando un récord de 260 GW en 2020. Además, las implicaciones socioeconómicas también han sido importantes.

GRÁFICO 9  
CUOTA DE NUEVA CAPACIDAD EN EL PERÍODO 2001-2020



Based on IRENA's renewable energy statistics.

Fuentes: IHS Energy Scenarios and Net Zero Cases 2021 (IHS-CERA).

Por ejemplo, en 2019, de los 58 millones de empleos en la industria energética, el 20 por 100 fueron en el sector renovable.

Sin embargo, indican que las políticas actuales son muy insuficientes para alcanzar el objetivo de 1,5 °C. El tiempo es esencial y, por ello, la reducción de emisiones debe hacerse de forma acelerada. En este sentido, este informe plantea una senda para alcanzar la neutralidad climática en 2050, focalizándose también en cambios estructurales y financieros. Para ello, el informe considera dos escenarios:

- *Planned Energy Scenario (PES)*: Este es un escenario *BAU* de referencia, en el que se consideran las políticas comprometidas en la actualidad.
- *1,5 °C Scenario (1,5-S)*: Este escenario describe una senda para alcanzar el objetivo de 1,5 °C del Acuerdo de París, priorizando las tecnologías

que ya están disponibles y que pueden escalar.

La urgencia con la que se requiere actuar hace que las políticas e inversiones que se lleven a cabo en esta década sean determinantes, y por ello es necesario hacer un análisis en profundidad de las acciones que deben llevarse a cabo de aquí a 2030. En este sentido, la guía de acciones en esta década estará alineada con las siguientes premisas:

- Apoyar a las tecnologías emergentes para que sean competitivas en el menor tiempo posible.
- Limitar inversiones en la industria petrolera y gasista.
- Utilizar *CCS* solo en los casos de fuerte dependencia de fuentes fósiles, donde no sea posible otra solución tecnológica.
- Terminar con los subsidios al carbón y las fuentes fósiles.

- Adaptar los mercados a la nueva realidad energética.
- Invertir en la promoción de la resiliencia, inclusión e igualdad, protegiendo especialmente a los trabajadores y comunidades afectados por la transición energética.
- Asegurar que todos los países y regiones pueden beneficiarse de la transición energética.

Para alcanzar el objetivo en 2050, IRENA considera que más del 90 por 100 de las soluciones se pueden alcanzar con el uso de renovables, electrificación, eficiencia energética, hidrógeno verde y bioenergía combinada con CCS (BECCS).

En 2050, la electricidad supondrá el 50 por 100 del consumo total de energía final, frente al 21 por 100 en 2018, por lo que la electrificación es un elemento clave. Esto transformará

varios sectores, especialmente el del transporte, en el que los vehículos eléctricos serán el 80 por 100 del parque global de vehículos.

La intensidad energética debería mejorarse en un 2,9 por 100 anual, lo que supondría aumentar la tendencia histórica dos veces y media. Esto puede alcanzarse mejorando la eficiencia energética, que se apoya en tecnologías ya disponibles que pueden escalarse de forma significativa. También se requerirá un cambio de comportamiento, que podría suponer un 10 por 100 de esta mejora. Así, se espera que el consumo de energía final se reduzca de 378 EJ en 2018 a 348 EJ en 2050.

El hidrógeno será un vector energético de gran importancia, contando con una cuota de consumo de energía final en 2050 del 12 por 100. Esto permitiría descarbonizar sectores intensi-

vos en el uso de energía como la industria acerera, química, transporte de largo recorrido, transporte marítimo y aviación. También se espera que juegue un papel importante en la estabilización del sistema eléctrico, así como en el almacenamiento estacional. Estiman que, en 2050, dos tercios del hidrógeno sea verde y un tercio azul.

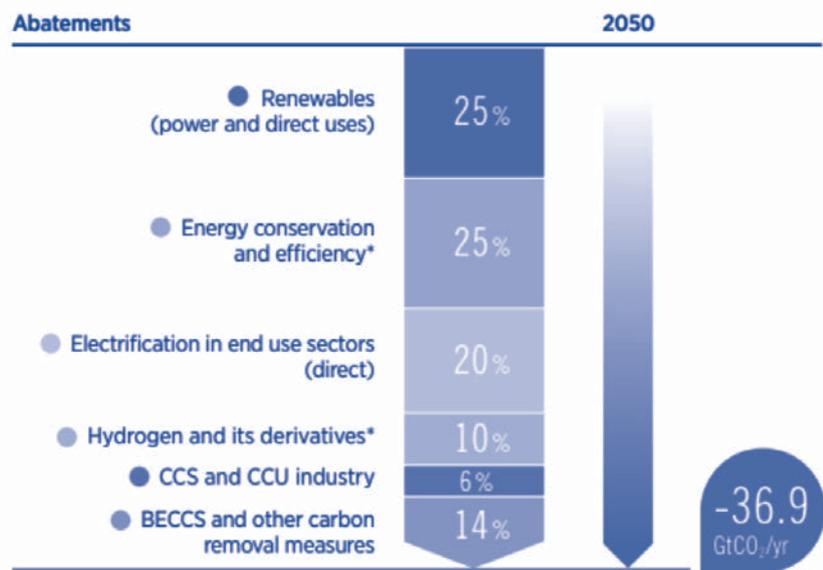
La bioenergía representará el 18 por 100 del consumo de energía final en 2050, siendo especialmente importante en la industria química y en la aviación. El uso combinado de biocombustibles con CCS en el sector eléctrico y en algunas industrias permitiría alcanzar emisiones negativas que son necesarias para lograr el objetivo de emisiones netas cero. Sin embargo, en otras industrias donde sea complicado sustituir el consumo de fuentes fósiles, el uso de CCS puede ayudar a abatir sus emisiones.

En cuanto a la financiación, se deben movilizar unos 131 trillones (americanos) de dólares en el período hasta 2050 para alcanzar el objetivo de 1,5 °C, mientras que, en la actualidad, los Gobiernos solo han comprometido movilizar 98 trillones en este mismo período. En este sentido, se concluye que el esfuerzo económico debe crecer. También, se considera que la financiación pública debe duplicarse para poder catalizar la inversión privada y garantizar que la transición es justa e inclusiva.

**7. International Energy Outlook 2021 (IEO), U.S. Energy Information Administration (EIA)**

La EIA es la agencia estadounidense de la energía, y su último informe, publicado en 2021,

GRÁFICO 10  
ABATIMIENTO DE EMISIONES EN EL ESCENARIO 1,5 °C



Fuentes: IHS Energy Scenarios and Net Zero Cases 2021 (IHS-CERA).

realiza un análisis a escala internacional, poniendo el foco en el período hasta 2050.

En primer lugar, el informe analiza las implicaciones de la pandemia en el sector energético, esperando que el consumo de energía recupere los niveles prepandémicos rápidamente en los países emergentes.

El informe se basa en un escenario principal de referencia, que incluye el impacto global de la pandemia, y que se basa en la legislación y regulación actual. Este caso supone una tasa de crecimiento del PIB mundial de un 2,8 por 100 anual, así como un precio del barril de crudo de 95 dólares (de 2020) en 2050. Además, exploran otros casos alternativos en los que varía el crecimiento económico y el precio de crudo.

Si se mantiene la tendencia de las políticas y tecnologías actuales, el consumo global de energía aumentaría en un 50 por 100 para 2050, como resultado del crecimiento económico y de

la población. En cuanto al *mix* energético, los combustibles líquidos siguen siendo la principal fuente de energía primaria en el caso de referencia, aunque crece en todos los casos analizados. Las renovables crecen y alcanzan un nivel similar a los combustibles líquidos.

En cuanto al sector transporte, el sector que más emisiones supone, se espera que el vehículo eléctrico contribuya a la reducción de emisiones, representando el 31 por 100 del total de vehículos de pasajeros. Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía también crecerían, a pesar de que la intensidad energética y de carbono decrecen.

Las energías renovables serían la principal fuente primaria de generación eléctrica, aunque otras fuentes no variables como el gas natural, el carbón y las baterías servirían para garantizar la seguridad de la red.

La producción de crudo y gas natural sigue creciendo, principalmente por el desarrollo eco-

nómico de los países asiáticos emergentes. Estos países liderarían el crecimiento en el consumo de combustibles líquidos.

### III. ANÁLISIS DE ESCENARIOS PARA EL SECTOR ENERGÉTICO ESPAÑOL

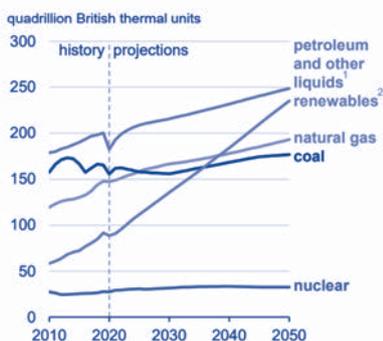
En esta sección se analizan los escenarios que plantean el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP) para España, por lo que existe una diferencia fundamental con los escenarios globales anteriormente descritos: no son escenarios utilizados para el análisis y el estudio de las posibilidades que plantea la transición energética, sino hojas de ruta a seguir para alcanzar determinados objetivos. Tanto el PNIEC como la ELP son las hojas de ruta a 2030 y 2050, respectivamente, para la transición energética en España. Por tanto, toda la legislación e inversiones que se implementen deberían estar basados en estos planes.

#### 1. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), Gobierno de España

El PNIEC es el programa que el Gobierno de España ha planteado para cumplir con los objetivos climáticos de la Unión Europea en 2030. El PNIEC se desarrolló atendiendo a los objetivos de la Unión Europea para ese año:

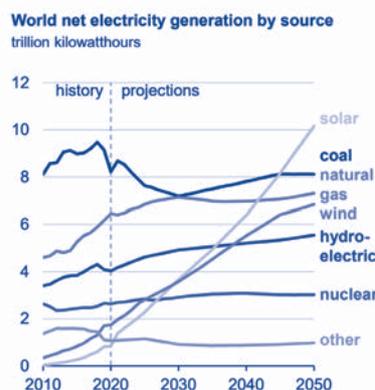
- 40 por 100 de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con respecto a 1990.
- 32 por 100 del consumo total de energía debe proceder de fuentes renovables.

GRÁFICO 11  
CONSUMO GLOBAL DE ENERGÍA PRIMARIA POR FUENTE



Fuentes: International Energy Outlook 2021 (IEO), U.S. Energy Information Administration (EIA).

GRÁFICO 12  
GENERACIÓN ELÉCTRICA GLOBAL POR FUENTE



Fuentes: International Energy Outlook 2021 (IEO), U.S. Energy Information Administration (EIA).

- 32,5 por 100 de mejora de la eficiencia energética.
- 15 por 100 de interconexión eléctrica entre los Estados miembros.

Estos objetivos europeos se renovaron con la presentación del paquete Fit-For-55, en el que se ampliaba la ambición climática, comprometiendo una reducción de las emisiones en al menos un 55 por 100 para 2030. Sin embargo, el PNIEC ya fue más ambicioso que los anteriores objetivos europeos, por lo que no se espera ningún cambio al respecto.

Los objetivos del PNIEC a 2030 son:

- 23 por 100 de reducción de emisiones de GEI respecto a 1990 (lo que supone una reducción del 48 por 100 respecto a 2005).
- 42 por 100 de renovables en el uso final de la energía.
- 39,5 por 100 de mejora de la eficiencia energética.
- 74 por 100 de energía renovable en la generación eléctrica.

El consumo de energía primaria se reduciría de los 123 Mtep en 2015 a los 104 Mtep en 2030. Esta reducción se produce gracias a una reducción del consumo de todas las fuentes energéticas, salvo las energías renovables, que crecen hasta alcanzar un consumo en 2030 que representa dos veces el de 2015.

En el sector eléctrico se espera que haya 161 GW de potencia instalada en 2030, cuya composición se apoya principalmente en la instalación de

CUADRO N.º 2  
CONSUMO PRIMARIO DE ENERGÍA INCLUYENDO USOS NO ENERGÉTICOS

AÑOS	2015	2020	2025	2030
Carbón	13.583	9.084	3.743	2.133
Petróleo y sus derivados	53.045	55.619	49.302	40.646
Gas natural	24.538	26.690	24.257	24.438
Energía nuclear	14.903	15.118	15.118	6.500
Energías renovables	16.620	20.764	26.760	33.383
Residuos industriales		302	303	381
RSU (no renovable)	252	168	142	66
Electricidad	-11	762	-1.202	-3.448
<b>Total</b>	<b>122.930</b>	<b>128.507</b>	<b>118.422</b>	<b>104.099</b>

Fuente: Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), Gobierno de España.

energía eólica y solar fotovoltaica, además de en tecnologías de almacenamiento que deberían aportar una potencia adicional de 6 GW, dando mayor capacidad de gestión a la generación.

El PNIEC, que se basa en los principios de neutralidad tecnológica y coste-eficiencia, diferencia por sectores la responsabilidad en la reducción de las emisiones: los sectores difusos contribuyen en un 39 por 100 a este objetivo, mientras que los sectores sujetos al sistema de comercio de derechos de emisión (*ETS*, por sus siglas en inglés) lo hacen en un 61 por 100. El sector transporte conseguirá una reducción del 33 por 100, obtenida principalmente del cambio modal, que afectaría al 35 por 100 de la demanda de movilidad y estaría impulsado por medidas como el establecimiento de zonas de bajas emisiones en las ciudades. Además, el 28 por 100 de vehículos deberían estar electrificados o utilizar biocarburantes avanzados.

En cuanto al uso de energía final, el objetivo del 42 por 100 de renovables se espera alcanzar principalmente de dos formas: por una parte, aumentando la

penetración de renovables eléctricas y térmicas, y por otro, disminuyendo notablemente la demanda de energía final gracias a los avances en ahorro y eficiencia energética.

El objetivo de mejora de la eficiencia energética en un 39,5 por 100 correspondería a una mejora de la intensidad energética primaria del 3,5 por 100 anual hasta 2030. El plan propone la ejemplaridad de las administraciones públicas, llevando a cabo iniciativas de renovación del parque edificatorio público.

En cuanto a seguridad energética, los distintos planos sobre los que se quiere abordar abarcan la reducción de la dependencia por la importación de energías fósiles, la diversificación de las fuentes, preparación ante posibles interrupciones de suministro y el aumento de la flexibilidad del sistema energético nacional. De esta forma, la dependencia exterior pasará del 74 por 100 en 2017 al 61 por 100 en 2030, mejorando también la balanza comercial. También se contempla que la transición en el sector eléctrico se haga de forma ordenada y segura, manteniendo siempre

cierta capacidad de respaldo (con ciclos combinados de gas, por ejemplo) y mejorando la interconexión con nuestros países vecinos.

Los precios internacionales de los combustibles fósiles, así como el del coste de emisión de CO<sub>2</sub> están dados por la Comisión Europea, y son los mismos que se utilizan para la ELP 2050.

También se quiere dar respuesta a algunos de los retos que se presentan en el mercado interior de la energía, protegiendo a los consumidores, especialmente los vulnerables, así como reforzando la competencia y la integración en el mercado europeo. Para ello, se impulsará la Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética.

Por último, el impacto económico será importante, suponiendo las inversiones totales para lograr los objetivos del PNIEC unos 241.412 millones de euros entre 2021 y 2030. Las inversiones se distribuirían en:

- Ahorro y eficiencia: 35 por 100.
- Renovables: 38 por 100.
- Redes y electrificación: 24 por 100.
- Resto de medidas: 3 por 100.

El origen de las inversiones vendría en un 80 por 100 desde el sector privado y un 20 por 100 desde el sector público. Además, se estima que haya un aumento neto del empleo de unas 300.000 personas y que tenga impactos redistributivos positivos, favoreciendo a los hogares de menor renta.

## **2. Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050 (ELP), Gobierno de España**

La ELP se define para marcar el camino hacia el objetivo de neutralidad en carbono en el año 2050. Su objetivo consiste en articular una respuesta coherente e integrada frente a la crisis climática, que aproveche las oportunidades para la modernización y competitividad de nuestra economía y sea socialmente justa e inclusiva.

Algo importante es que la ELP no marca los cambios tecnológicos concretos en los diferentes sectores, sino que presenta una propuesta sobre esta transformación utilizando el conocimiento científico-técnico disponible en la actualidad.

Al igual que el PNIEC, la ELP se basa en los principios de neutralidad tecnológica y coste-eficiencia. Los principales objetivos específicos de la ELP son:

- Desacoplar el consumo de energía final del crecimiento económico.
- 97 por 100 de energías renovables en el consumo final de energía.
- 100 por 100 de renovables en el sector eléctrico.
- Disminuir la dependencia energética exterior del 73 por 100 hasta el 13 por 100, ahorrando 344.000 millones de euros en importación de combustibles fósiles.
- Al menos la mitad de la economía estará electrificada, instalando en torno a 250 GW de potencia renovable para ello.

— Desarrollo del hidrógeno y combustibles renovables.

— 90 por 100 de reducción de emisiones con respecto a 1990, alcanzando la neutralidad climática gracias a los sumideros de carbono.

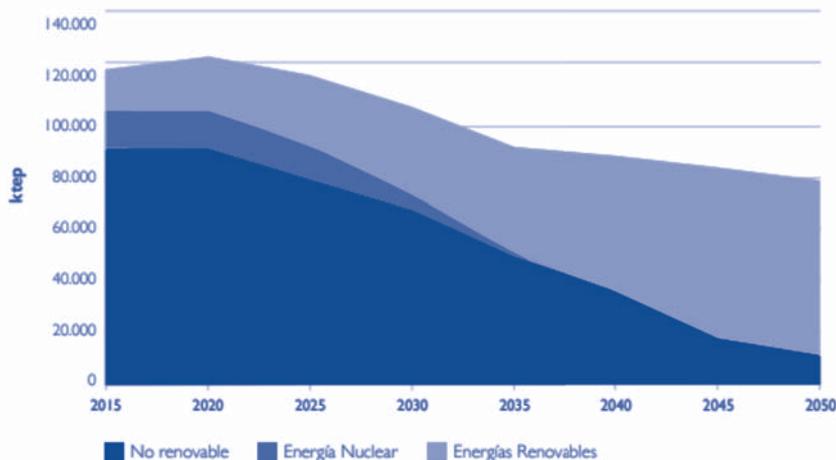
— Avanzar en la adaptación al cambio climático, la cual tiene importantes sinergias con la mitigación.

La ELP marca la ambición climática de España, tratando de situarla como uno de los países europeos que impulse el cambio y apoyándose en los potenciales recursos renovables del país. Además, la transición justa ocupa un lugar importante en la ELP, indicando la importancia de la equidad y la justicia social durante la transición, que se materializa en la Estrategia de Transición Justa y la Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética. Estas estrategias se centran especialmente en los colectivos y sectores más vulnerables, así como en las regiones en transición justa.

El transporte deberá reducir sus emisiones cerca del 98 por 100 respecto a valores actuales, siendo un 79 por 100 de la energía final de origen renovable. Los edificios deberán reducir el 100 por 100 de sus emisiones, mientras que otros sectores más complicados de descarbonizar tienen mayor margen: la industria deberá reducir sus emisiones en un 90 por 100 y el sector agropecuario en torno al 60 por 100.

El impacto económico será positivo, con cálculos que estiman en 300.000 los empleos netos al año durante todo este período. Las inversiones totales acumuladas en el período posterior al PNIEC, 2031-2050, serán de unos 500.000 millones de euros.

GRÁFICO 13  
**CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN EL ESCENARIO ELP**  
 (Incluye usos no energéticos)



Fuentes: ELP 2050, 2020 (Gobierno de España).

En cuanto al consumo de energía primaria, se espera que se reduzca significativamente gracias a las mejoras en eficiencia energética y el impulso de la economía circular y cambio de hábitos. Además, los combustibles no renovables disminuyen de forma importante.

En lo que respecta al consumo final de energía, el escenario ELP marca la senda de penetración de energía renovable para cada lustro, alcanzando el 97 por 100 final en 2050.

La generación eléctrica para satisfacer la demanda tendría una tendencia creciente, alcanzando un pico en 2045. Este crecimiento recae en las fuentes renovables, además de suponer un aumento del almacenamiento, que iría sustituyendo a las fuentes fósiles como respaldo.

En cuanto al precio de los combustibles fósiles, los datos están alineados hasta el año 2040 con los considerados por la Comi-

sión Europea para la realización de los PNIEC por parte de los Estados miembros. Para el período 2040-2050 se toman los precios que utiliza el Centro Común de Investigación (Joint Research Centre, JRC) de la Comisión Europea en su modelo POTEnCIA.

### 3. Escenarios para el sector energético en España (2030-2050), Economics for Energy

El informe publicado en el año 2017 plantea una serie de escenarios energéticos posibles para el sector energético español en 2030 y 2050, y evalúa sus consecuencias económicas, ambientales y tecnológicas. Los escenarios son cuatro, aunque uno de ellos, el de *mantenimiento de políticas actuales*, ha quedado obsoleto en los cinco años que han pasado desde su publicación por la actualización tan importante que han experimentado las políticas energéticas en España, por lo que se obviará en este informe:

— *Descarbonización*: Este escenario asume el compromiso de reducción de emisiones de GEI del Acuerdo de París. Se estima un incremento de la población de un 0,3 por 100 cada año hasta 2050. Al mismo tiempo, se prevé un incremento del PIB de un 1,5 por 100 cada año hasta 2050, de nuevo con respecto a 2015. Sin embargo, la demanda final de energía se reduce en un 9 por 100 en 2030 y 2 por 100 en 2050.

En cuanto a los objetivos de descarbonización, España sigue lo indicado por la Comisión Europea: un 40 por 100 de reducción en 2030 (más ambicioso que el PNIEC), y un 95 por 100 de reducción en 2050, en ambos casos con respecto a 1990.

— En cuanto al sector energético, se reducen significativamente los precios del carbón y petróleo debido a la también considerable reducción en su demanda. El precio del gas experimenta un ligero aumento por el incremento de la demanda que surge, en primer lugar, por su papel como sustituto del carbón, y luego de su papel como tecnología de respaldo de las renovables. Se produce una reducción de costes de algunas tecnologías, especialmente renovables para generación eléctrica y de transporte eléctrico, lo que contribuye a su amplia implantación en 2050. Las tecnologías de eficiencia energética también cobran un importante impulso. Los objetivos de descarbonización son los que la Comisión Europea indica para España: un 40 por 100 de reducción de las emisiones en 2030, y un 95 por 100 en 2050, en ambos casos con respecto a 1990.

— *Avance tecnológico acelerado:* En este escenario se produce un progreso tecnológico sin parangón en el período 2015-2050. Así, hay un importante desarrollo tecnológico de las tecnologías renovables para generación eléctrica y de almacenamiento. No obstante, también se desarrollan fuertemente las tecnologías de *fracking* y los ciclos combinados de gas. La innovación es el motor de una economía que crece a un ritmo superior al 2 por 100 anual, llegando a picos del 5,5 por 100, y que es capaz de reducir muy significativamente los costes tecnológicos.

— La descarbonización de la economía es muy acusada en este escenario, aunque no gracias a la preocupación por el cambio climático, sino directamente a la innovación. El escenario de precios de combustibles es muy similar al de descarbonización: tanto el petróleo como el carbón experimentan una clara reducción, mientras que el gas experimenta una leve bajada. La mayor demanda de servicios energéticos y el efecto rebote por el abaratamiento de la energía resultan en un escenario de demanda final en que, al contrario que en los presentados anteriormente, la demanda final aumenta significativamente (un 3 por 100 en 2030 y un 23 por 100 en 2050). En este escenario, la reducción de emisiones en 2030 no es tan significativa con respecto al escenario anterior (150 Mt frente a los 111 Mt del escenario de descarbonización). Sin embargo, en 2050 se consigue la neutralidad climática, sin emisiones netas de CO<sub>2</sub>. El precio

sombra del CO<sub>2</sub> en 2050 es de 560 €/t.

— *Estancamiento secular:* La pieza clave de este escenario es la ralentización del crecimiento económico, asociada fundamentalmente a una menor capacidad de innovación en las economías. Esto hace que las tecnologías energéticas no experimenten reducciones de costes significativas, con el consiguiente impacto en el despliegue de nuevas tecnologías. Así, la fuerte dependencia de los combustibles fósiles sigue siendo la realidad de 2050. El aumento de la demanda de carbón hace que, al contrario que en el resto de los escenarios, se produzca un incremento en su precio. El gas mantiene la tendencia alcista ya observada en los otros escenarios, aunque en este caso mucho más acusada. Finalmente, el precio del barril de petróleo se mantiene en torno a los 50 euros porque la demanda no se recupera y la oferta se mantiene esencialmente estable, o quizá algo más reducida por el menor avance tecnológico.

— La ralentización del crecimiento económico, junto con la activación de las medidas tecnológicas de eficiencia energética, llevan a una reducción muy importante de la demanda de energía final (un 10 por 100 con respecto a 2015), estabilizándose de hecho entre 2030 y 2050. En cuanto a las emisiones, es interesante ver que la restricción de emisiones de CO<sub>2</sub> para 2030 podría cumplirse sin problemas con un precio del CO<sub>2</sub> nulo. Sin embargo, en 2050 las emisiones

de CO<sub>2</sub> apenas descienden, alcanzando las 150 Mt (cifra similar al escenario de avance tecnológico acelerado en 2030), aunque tendrían un coste de 40 €/tCO<sub>2</sub>.

Los resultados son distintos para los dos horizontes temporales. Así, para 2030, los diferentes escenarios coinciden en que será relativamente sencillo cumplir con los objetivos europeos de descarbonización previstos para España. Sin embargo, las inversiones requeridas para alcanzar dicho objetivo pueden no ser coherentes con los objetivos de largo plazo. Así, en los escenarios más laxos de 2030 se instala fundamentalmente nueva potencia eléctrica alimentada con gas natural, que no podría seguir existiendo (o debería reducirse en gran medida) en 2050, lo que plantea importantes retos desde el punto de vista de la remuneración de estas inversiones y de la coherencia en costes de los escenarios. En este sentido, para asegurar la compatibilidad entre los distintos horizontes considerados es fundamental el diseño de un sistema de señales económicas e institucionales a largo plazo (incluyendo un diseño adecuado del mercado eléctrico, y también de los precios de la energía) que marquen la dirección correcta de evolución del sistema energético español.

Si analizamos el *mix* energético en 2050, el escenario de descarbonización se apoya principalmente en la biomasa, la eólica y la solar fotovoltaica, con una presencia menor pero notable del biodiesel. En el escenario de avance tecnológico acelerado, el *mix* se parece bastante, aunque la energía nuclear no desaparece en 2050, sino que ocupa una cuota superior al 10 por

100, mientras que el resto de las fuentes energéticas primarias con mayor peso siguen siendo las mismas. Por último, el escenario de estancamiento secular presenta una dominancia de las fuentes fósiles que supera el 60 por 100, siendo la principal el gas natural, seguida del petróleo. La principal fuente renovable sería la biomasa.

Un resultado importante es la importancia del ahorro y la eficiencia energética para lograr los objetivos de descarbonización a un coste razonable, e incluso aunque los objetivos de reducción de emisiones se relajen, el sistema sigue beneficiándose de la promoción de medidas económicamente rentables de ahorro y eficiencia. Así la electrificación de los consumos finales, en particular el sector terciario y el del transporte, permite reducir emisiones y ahorrar energía. De hecho, el grado de electrificación aumenta cuando se endurecen los objetivos de reducción de emisiones. A este respecto, la velocidad de penetración en el mercado de estas tecnologías eficientes se convierte en un factor muy relevante para la consecución de objetivos y por ello la existencia de barreras a dicha penetración puede dificultar sobremanera la transición energética.

El sector eléctrico tiene un papel central en el proceso de transición energética. Parte de las medidas de ahorro requieren una electrificación creciente de la economía, lo que lleva en 2050 a crecimientos significativos de la demanda eléctrica en todos los escenarios, especialmente en el de avance tecnológico, donde alcanza los 538 TWh en comparación con los 230 TWh actuales, es decir, más del doble. En el escenario de descarbonización

casi se duplica, llegando a los 443 TWh. Adicionalmente, el modelo indica que el sector eléctrico es la opción más barata para reducir emisiones de CO<sub>2</sub>. La generación eléctrica se descarboniza totalmente en 2050 (y la generación con carbón desaparece ya en 2030) incluso en los escenarios en que la reducción de emisiones es menos ambiciosa (salvo cuando la evolución tecnológica se retrasa). Esta descarbonización se logra fundamentalmente con energías renovables: en el escenario de descarbonización, la eólica (~ 43 por 100) y solar fotovoltaica (~ 50 por 100) ocupan prácticamente todo el *mix* eléctrico, junto con la hidráulica que supone el resto de la capacidad y desempeña principalmente una función de respaldo.

Por último, indican que los grandes retos serían los asociados a la necesidad de acomodar la generación variable a la demanda (o viceversa), mediante

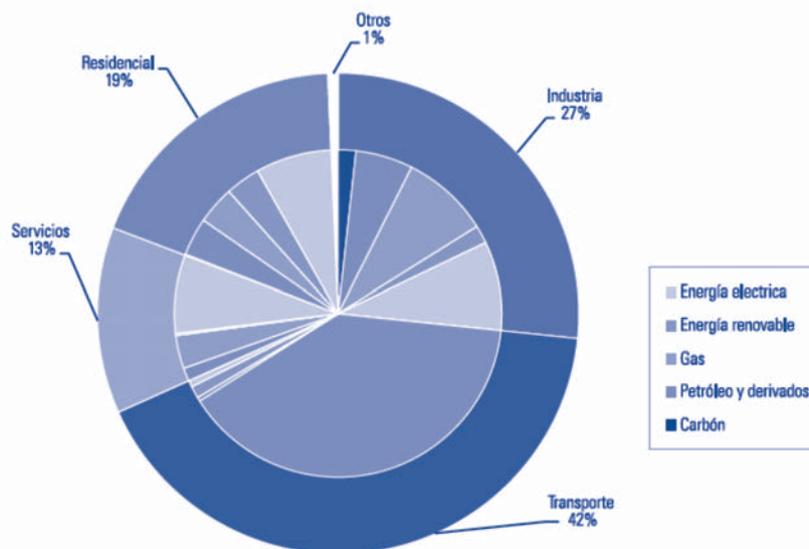
una generación de respaldo despachable y libre de emisiones de CO<sub>2</sub> o con almacenamiento de gran escala, así como otros retos importantes para la descarbonización de la industria y del transporte pesado.

Así pues, aunque los objetivos para el sector energético español a 2030 parecen asequibles, los que se plantean a un plazo mayor son complejos y exponencialmente mayores a medida que aumenta el nivel de descarbonización a alcanzar, por lo que hacer análisis a largo plazo resulta esencial.

#### IV. CONCLUSIONES

El Acuerdo de París tiene como objetivo mantener el aumento de temperatura por debajo de los 2 °C, lo que hace imprescindible una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero sin precedentes en la historia. Por este motivo, la

GRÁFICO 14  
COMPOSICIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA POR SECTOR EN 2015



Fuentes: Escenarios para el sector energético en España (2030-2050, Economics for Energy).

<p>transición energética es indispensable, y el estudio de escenarios energéticos nos permite realizar análisis cuantitativos y cualitativos sobre la mejor forma de actuar y tomar decisiones ante este desafío.</p> <p>Aunque los informes analizados construyan escenarios basándose en planteamientos y filosofías diferentes, se pueden extraer varias conclusiones que son transversales a la mayoría de ellos:</p> <p>(I) En primer lugar, la transición va a requerir un volumen ingente de recursos económicos para que se pueda llevar a cabo. Esto es algo fundamental, y va a requerir la movilización de fondos e inversiones, tanto por parte del sector privado como público.</p> <p>(II) En cuanto al despliegue tecnológico, las energías renovables deberán expandirse de forma muy importante, así como la electrificación de diferentes sectores de la economía, especialmente la movilidad (con el vehículo eléctrico como protagonista) y los sistemas de climatización. Las tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) también pueden tener un papel fundamental en el abatimiento de aquellas emisiones para</p>	<p>las que aún no hay ninguna alternativa tecnológica.</p> <p>(III) Nuevos vectores entrarán con fuerza en la matriz energética: se espera que la biomasa y el hidrógeno renovable se comience a usar a gran escala.</p> <p>(IV) La participación ciudadana también será esencial. Los cambios de comportamiento y hábito deben ser uno de los motores que muevan la descarbonización. El cambio modal en el transporte y otras formas más responsables de consumo serán clave.</p> <p>Cuando estudiamos las hojas de ruta para España, podemos concluir que la ambición climática de nuestro país es elevada. Esto también se debe a que las regiones más desarrolladas, como Europa, tienen mayor responsabilidad en las emisiones históricas y, por tanto, deben asumir un mayor esfuerzo.</p> <p>El principal objetivo de España es el de ser una economía neutra en carbono para el año 2050, para lo que deberá afrontar una serie de retos tecnológicos y sociales:</p> <p>(I) Abandonar los combustibles fósiles, y sustituirlos por energías renovables.</p>	<p>(II) Electrificar al menos la mitad de la economía.</p> <p>(III) Desarrollar nuevos vectores energéticos, como el hidrógeno y otros combustibles renovables.</p> <p>(IV) Transformar sectores económicos clave, como el transporte, los edificios o la industria.</p> <p><b>BIBLIOGRAFÍA</b></p> <p>AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA (IEA) (2021). <i>World Energy Outlook 2021</i>.</p> <p>BLOOMBERG NEF (2021). <i>New Energy Outlook 2021</i>.</p> <p>BP (2020). <i>BP Energy Outlook 2020</i>.</p> <p>ECONOMICS FOR ENERGY (2017). <i>Escenarios para el sector energético en España (2030-2050)</i>.</p> <p>GOBIERNO DE ESPAÑA (2020). <i>Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo</i>.</p> <p>GOBIERNO DE ESPAÑA (2021). <i>Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)</i>.</p> <p>IHS MARKIT (2021). <i>2021 Energy Scenarios and Net Zero Cases</i>.</p> <p>IRENA (2021). <i>World Energy Transitions Outlook: 1,5 °C Pathway</i>.</p> <p>SHELL (2021). <i>The Energy Transformation Scenarios</i>.</p> <p>U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA) (2021). <i>International Energy Outlook 2021</i>.</p>
--	---	---