



Programa INVESTIGA I+D+i 2022/2023

GUÍA ESPECÍFICA DE TRABAJO SOBRE "EL FUTURO MIX ENERGÉTICO SIN EMISIONES"

Texto de D. Ignacio Cruz

INTRODUCCIÓN.

Cada día vemos con mayor rotundidad los posibles efectos que el cambio climático puede producir en múltiples aspectos que afectan a nuestra sociedad. (subida de la temperatura ambiente a nivel global, deshielo de los glaciares, falta de precipitaciones, períodos prolongados de sequía, fenómenos climáticos extremos, aumento del nivel del agua del mar, etc.). Como consecuencia de estos efectos, debemos también resaltar los relativos a la economía como son por ejemplo la reducción de las cosechas, de la pesca, o incluso posibles afecciones en la salud de la población, pero no debemos olvidar que ésta indeseada evolución climática puede también afectar decisivamente a las fuentes de suministro de la energía que consumimos continuamente.

La razón es simple, si queremos proteger nuestro maltrecho equilibrio climático, hay que reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero, producidas en general por la combustión de fuentes fósiles. Una vía de mitigar o anular en una gran proporción esas emisiones pasa en la actualidad por la aplicación masiva de tecnologías que conviertan eficazmente en energía útil las fuentes consideradas renovables (sol, viento, agua, geotermia, oceánicas, bioenergía, etc.) y estas a su vez van a estar influidas por los efectos del propio cambio climático. Por lo tanto, si logramos ralentizar lo más posible el cambio climático, podremos tener un futuro estable al menos en lo que concierne al suministro de energía.

Existen otras potenciales soluciones como son el uso de la energía nuclear de fisión o las tecnologías de secuestro, almacenamiento y uso

del CO₂ mediante las cuales se pueden seguir utilizando fuentes fósiles pero evitando la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Por lo tanto, ha quedado claro que la energía es un componente muy importante de nuestra economía. Todos tenemos claro que el uso masivo de las energías fósiles (carbón, petróleo, gas natural) tanto en la producción de energía eléctrica y térmica para uso residencial y/o industrial y sobre todo su uso masivo en la movilidad tanto en vehículos privados como en el transporte pesado (camiones, barcos) o aviación están incidiendo en una determinada proporción en el proceso de cambio climático, pero también sabemos que las constantes fluctuaciones del precio de la energía tienen un gran impacto en la economía y en los mercados financieros. En este sentido, la energía como hoy está establecida, trasciende de la esfera económica y es muy dependiente de la situación geopolítica global como desafortunadamente estamos experimentando con los diferentes conflictos actuales. Además, el continuo aumento de la demanda de energía a nivel global hace que se produzcan mayores tensiones si cabe. Y al final estas tensiones se trasladan a los precios que todos pagamos por nuestro consumo de energía por lo que la interdependencia entre la energía y la sociedad es muy alta.

Por estas razones, Europa a la cabeza y progresivamente el resto de los países del mundo también llevan años desarrollando ambiciosos planes de descarbonización de la sociedad que están avanzando en la modificación de su mezcla de fuentes energéticas utilizadas, denominado en el argot energético como "mix energético" tanto para producción de electricidad y calor como para la movilidad desde las fuentes de energía fósiles más emisoras (carbón, petróleo, fuel) a las menos emisoras (gas natural) y a las energías renovables principalmente aunque con una importante dependencia en muchos países de la energía nuclear de fisión, que no presenta problemas de emisiones pero sí que constituye un reto la adecuada gestión de los residuos, normalmente de larga duración y de la seguridad.

A pesar de los esfuerzos realizados hasta la fecha, el mix energético de España, de Europa y del Mundo en general sigue dependiendo excesivamente de los combustibles fósiles. Las emisiones de gases de efecto invernadero en 2021 en España superaron los 36 millones de toneladas de CO₂ equivalentes. El uso del hoy en día costoso gas natural, 100% importado, con la intención de utilizarlo como energía de respaldo en situaciones de falta de energías renovables variables, normalmente eólica y fotovoltaica y el uso esporádico de carbón debido a su coste mas competitivo mantiene el nivel de emisiones todavía en valores altos.

Por lo tanto, el objetivo es en primer lugar aplicar técnicas de eficiencia energética a todos los niveles, de forma que nos permita reducir la intensidad energética sin perder calidad de vida, lo cual es crucial. Además hay que desarrollar un proceso de electrificación, especialmente en la climatización de las viviendas y en la movilidad privada, pero también en los procesos industriales en los que sea posible. A partir de ahí, tenemos que expandir lo más posible la capacidad de generación a partir de energías renovables. La competitividad alcanzada en la tecnología, hidráulica, eólica y solar fotovoltaica principalmente en los últimos años nos va a facilitar dicho progreso, pero hay que desarrollar más tecnologías limpias que nos permita enriquecer dicho mix para hacerlo más robusto (tecnologías termosolares, oceánicas, geotermia, biomasa, biocarburantes, biogases etc.) pero no debemos olvidar que en el caso de la producción de electricidad hay que gestionar de forma eficaz la producción a partir de estas fuentes variables intermitentes dependientes de las condiciones meteorológicas, por lo que un elemento crítico en el mix energético serán las centrales de almacenamiento de energía, hasta ahora prácticamente solo basadas en tecnología de bombeo hidráulico reversible allí donde la orografía lo permite, con una capacidad mundial actual de 160 GW/9000 GWh, que conjuntamente con la integración con un nuevo vector energético como es el hidrógeno y otras tecnologías de almacenamiento (baterías electroquímicas, aire líquido o comprimido) se espera que permitan alcanzar el ansiado objetivo de alcanzar las emisiones nulas en el entorno de 2050 [2][3].

En esta guía, intentaremos dar ideas acerca de las sendas previstas en la descarbonización de España desde la actualidad hasta 2050 [4][5] previendo la evolución del mix energético e intentando identificar los problemas que pueden surgir en dicha transición energética y pensar entre todos como se pueden mitigar o superar dichas problemáticas. El ejercicio es muy interesante ya que sois vosotros los que vais a disfrutar de dicho mix energético que espero que sea libre de emisiones.

Para establecer el mix energético, existen múltiples herramientas de planificación energética. La planificación energética es crucial si tenemos en cuenta que dependiendo de la estrategia que se siga habrá que planificar costosas infraestructuras que además requerirán en algunos casos de largos plazos de maduración. Esta actividad afectará también a la economía de los distintos países tanto por el lado de la inversión necesaria como por los recursos humanos necesarios para llevarlo a cabo.

Si quieres ver cómo ha evolucionado el mix energético de cualquier país del mundo en los últimos años puedes acceder a la publicación en línea

de OurWorldInData [8] [9] que presenta datos y resultados empíricos que muestran el mix de energía primaria y el mix eléctrico en todo los países del mundo. Los resultados son mostrados por medio de gráficos y mapas interactivos que muestran las tendencias de cambio por país y región.

El futuro mix energético a nivel mundial.

El peso de la energía en la actividad económica es muy significativo (cerca del 9% del PIB mundial según cálculos de Caixabank Research) y sus fluctuaciones de precios tienen un impacto indudable sobre la economía y los mercados financieros. Los recursos energéticos, especialmente los fósiles se encuentran en distintas áreas geográficas, por lo que presenta una gran incidencia en las relaciones geopolíticas globales, llegando a crear situaciones límite. Por otro lado, como ya se ha comentado, el uso de las distintas fuentes de energía afecta al medioambiente local y global, especialmente en el caso de las energías fósiles debido a las emisiones provocadas en su combustión.

Por estas razones, éste análisis trasciende a los países, siendo una problemática global. Para establecer objetivos conjuntos especialmente en la lucha contra el cambio climático se acordó en 1997 el "Protocolo de Kioto" considerado como el primer gran acuerdo internacional para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este protocolo, solo los países desarrollados tenían la obligación de recortar sus emisiones un 5% de media anual entre 2008 y 2012, respecto a las del año tomado como base que eran las emisiones en 1990.

A partir de dicho protocolo, se han sucedido diversas conferencias auspiciadas por las Naciones Unidas [1]. En este sentido, reseñar la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) celebrada en París en 2015, la cual constituyó un hito histórico ya que por primera vez tanto los países desarrollados como los países en vías de desarrollo, se comprometían a reducir conjuntamente las emisiones de gases de efecto invernadero, fundamentalmente las de dióxido de carbono (CO₂). En este evento logró firmar el denominado Acuerdo de París por parte de 195 naciones y a primeros del año 2016 ya lo habían ratificado 189 naciones. Recalcar que el cumplimiento del Acuerdo de París se considera voluntario, sin embargo la presentación de compromisos es vinculante, involucra a todas las naciones y, también por vez primera involucraba a actores no estatales como son los gobiernos regionales y locales, las empresas, los inversores y la sociedad civil en general.

	PAIS	Energía eléctrica generada (TWh) 2020	% s/mundial
1	China	7601	29,6%
2	Estados Unidos	4049	15,8%
3	India	1452	5,7%
4	Rusia	1027	4,0%
5	Japón	889	3,5%
6	Canadá	630	2,5%
7	Brasil	622	2,4%
8	Francia	554	2,2%
9	Corea del Sur	550	2,1%
10	Alemania	545	2,1%
11	Arabia Saudita	344	1,3%
12	México	305	1,2%
13	Irán	304	1,2%
14	Reino Unido	300	1,2%
15	Turquía	294	1,1%
16	Italia	282	1,0%
17	Taiwan	279	1,0%
18	Indonesia	275	1,0%
19	Australia	265	1,0%
20	España	256	0,99%

Tabla 1. Ranking de países del mundo por energía generada en 2020 y % sobre el total de generación mundial. Fuente: Total Electricity Net Generation 2020, AIE (16/08/2022)

En la actualidad, el país con mayor consumo de energía del mundo es la República Popular de China (PRC) con un consumo en energía eléctrica de más de 7.000 TWh/año (2020) y responsable del 25% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Este consumo de energía se debe especialmente a la gran actividad industrial, por lo que el proceso de descarbonización supone un gran reto.

China firmó el acuerdo de París y presentó un plan en octubre de 2021 contra el cambio climático en el que se incluyeron las acciones para alcanzar el máximo de emisiones de carbono antes de 2030 y alcanzar en el año 2060 la neutralidad de carbono, es decir, que para esa fecha la cantidad de emisiones no superarán a las que se absorberán a través de los sumideros (por ejemplo, los bosques).

El gobierno chino estableció como objetivos claves, la promoción de transporte ecológico y bajo en carbono, el avance en una economía circular, el apoyo a la innovación tecnológica y acordó el compromiso con una vía verde y baja en carbono hacia el desarrollo. Otras medidas incluían fortalecer el control sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, dar protagonismo al rol del mercado de carbono y aumentar el apoyo financiero-ecológico. [14][15]

El segundo país del mundo con mayor consumo de energía es Estados Unidos, con alrededor de 4000 TWh/año de consumo eléctrico en 2020. La administración demócrata que gobierna ahora EEUU también ha establecido un plan para lograr descarbonizar el país en 2050.[12][13]

Europa, uno de los continentes con mayor consumo de energía, a través de los países que componen la Unión Europea y sus países asociados se ha constituido como líder de esta transición hacia un futuro energético descarbonizado que se prevé alcanzar en el año 2050. Para ello ha establecido una serie de planes cada vez más ambiciosos. Primero fue el Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático 2013-2020 firmado en 2008 y posteriormente la hoja de ruta 2050 el Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático 2030 que ha obligado a todos los países a establecer un Plan Integrado de Energía y Clima para 2030, el ambicioso Pacto Verde Europeo para lograr la neutralidad en carbono en 2050 y últimamente el objetivo 55 (Fit for 55%) que obliga a reducir las emisiones en 2030 en un 55%. [17][18][19][20][21][22][23][24]

Otros países con gran consumo de energía como la India con un consumo de energía primaria basado en combustibles fósiles cercano al 75% en 2020, se encuentra también incorporándose a esta estrategia mediante planes nacionales como el aprobado recientemente con objetivos claros de reducir las emisiones un 45% en 2030 o lograr la neutralidad en emisiones en 2070.

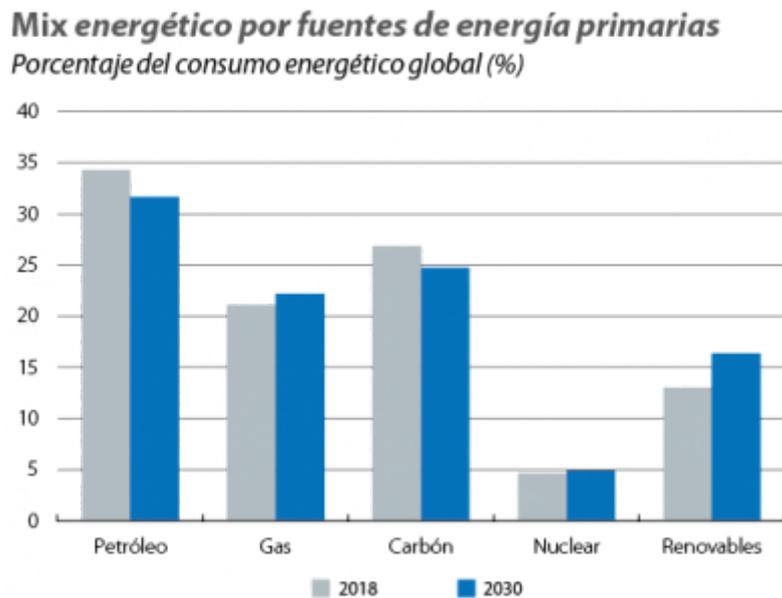
Otro gran productor de energía eléctrica es Rusia, en su gran mayoría producida con fuentes fósiles (60%) de las que es un gran productor. El resto lo produce con energía hidroeléctrica (20%) y nuclear de fisión (20%). Casi no tiene implantación de tecnología eólica o solar pero la Federación Rusa aprobó una 'Estrategia de desarrollo socioeconómico de la Federación Rusa con bajas emisiones de gases de efecto invernadero para 2050' en octubre de 2021. Como parte de esta estrategia, Rusia se ha comprometido a alcanzar cero emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) para 2060.

En definitiva, prácticamente todos los países de la tierra tienen ya una estrategia de descarbonización más o menos ambiciosa. En teoría podríamos decir que se puede alcanzar la neutralidad global en el entorno de 2070. Esperemos que no sea demasiado tarde.

Pero para lograr esos planes que están en un papel hay que hacer muchas acciones. Una de ellas es reducir el consumo de energía con la menor afección a la calidad de vida, la segunda es modificar progresivamente ese mix energético de generación de energía eléctrica de acuerdo a las posibilidades de recursos de cada país y la tercera es ir

modificando el mix de energía "primaria" también hacia la descarbonización. Este último objetivo será el más complejo de alcanzar.

Nosotros nos vamos a centrar por ahora en analizar la evolución del mix eléctrico teniendo en cuenta que gran parte del consumo que actualmente depende de fuentes fósiles por ejemplo para calefacción o para movernos en coche va a trasladarse a consumo eléctrico mediante la estrategia de electrificación, pudiéndose de esta manera abastecerse con fuentes de energía libres de emisiones.



Fuente: CaixaBank Research, a partir de datos de la EIA, el FMI y la Oficina Nacional de Estadística china.

Como es el mix eléctrico actual (2021)

El mix o mezcla de tecnologías generadoras de energía eléctrica varía en los distintos países dependiendo de la disponibilidad de fuentes de energía y de su desarrollo. Puedes ver el mix actual instantáneo de muchos países en la siguiente página Electricity map [7]. Esta página te indica de forma gráfica el grado de energía libre de emisiones que utiliza cada país.

Por ejemplo, hay países con el mix muy basado en energía nuclear como Francia con un 70% de la energía producida en sus 56 reactores nucleares de fisión. La segunda fuente es la hidroeléctrica que no tiene emisiones tampoco y finalmente el gas natural y la energía eólica.

Otros países dependen mucho del carbón como Polonia (72% proviene del carbón bien sea hulla (48%) o lignito (24%) ó también Alemania (30% de la energía proviene del carbón, casi 50% de renovables sobre todo eólica (24%) y solar fotovoltaica (11%) y el gas natural con el 15%).

En España, en el año 2021 la primera fuente ha sido la energía eólica con un 24%, después se sitúa la energía nuclear de fisión con el 22%, el gas natural utilizado en centrales de ciclo combinado con un 15%, la hidroeléctrica con un 12%, la cogeneración con un 11% y la solar fotovoltaica con un 8%. En total las energías renovables han supuesto el 43,7% del suministro de energía eólica. Te recuerdo que el objetivo 55 de la Unión Europea es llegar a un mínimo del 40% de la energía primaria producida con energías renovables.

Es importante diferenciar entre fuentes de energía primaria y fuentes de energía eléctrica. La energía primaria incluye además de la electricidad el transporte, la producción de calor y de algunos componentes químicos como el hidrógeno que hoy por hoy se basan mayoritariamente en fuentes de energía fósiles. Por ello, la importancia de la electrificación para poder ir desplazando combustibles fósiles por electricidad producida con energías renovables.

En energía primaria, en España solo se alcanza el 22% de la energía con fuentes renovables siendo el petróleo todavía la primera fuente (44%) y el gas natural la segunda (22%). En el mix de energía eléctrica sin embargo, el petróleo y el carbón prácticamente han desaparecido, emergiendo las energías renovables (eólica y solar fotovoltaica principalmente) y la energía nuclear de fisión, por lo que el mix eléctrico está claramente más descarbonizado. Se observa por lo tanto que si queremos lograr la descarbonización total donde hay que actuar, especialmente reduciendo en consumo de combustibles fósiles que todavía son masivamente utilizados en algunas aplicaciones de la energía (transporte, calor, industria).

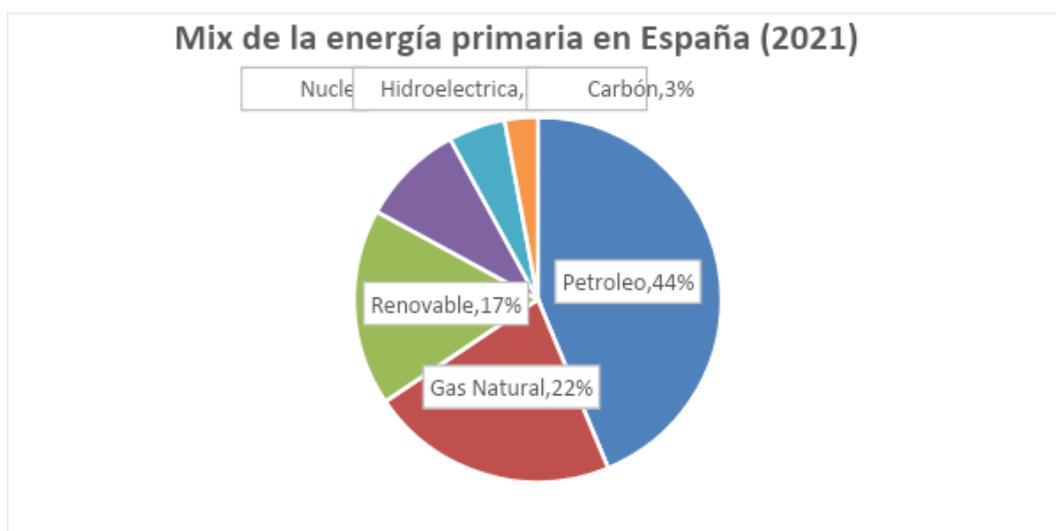


Figura 1. Mix de energía primaria en España (2021). Fuente: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico MITERD

<https://www.miteco.gob.es/es/>

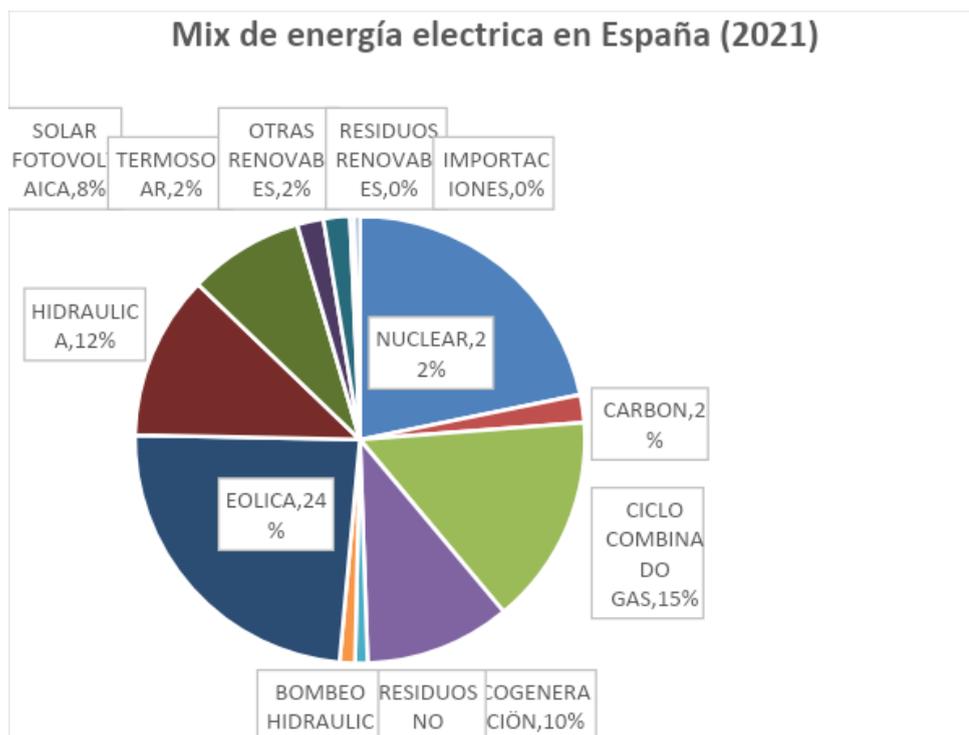
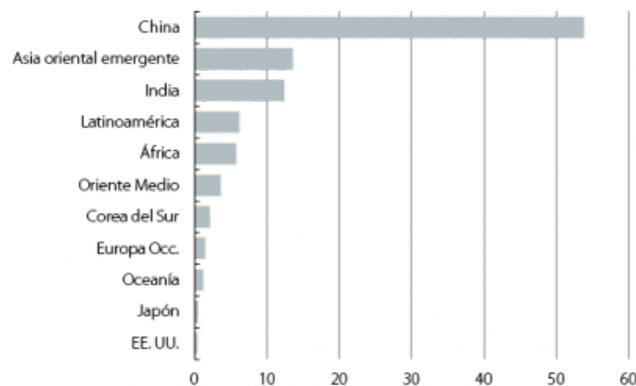


Figura 2. Mix de energía eléctrica en España (2021). Fuente: REE Red Eléctrica de España

Cómo debería evolucionar el mix energético

Para analizar la evolución de la transición energética se establecen diversos escenarios que dependerán de múltiples variables. El reto es lograr una progresiva transición hacia fuentes menos emisoras sin que el crecimiento económico se deteriore, especialmente en los países con crecimiento de su consumo energético.

**Crecimiento del consumo energético global
entre 2018 y 2030 por zonas geográficas**
Porcentaje sobre el total mundial (%)



Fuente: CaixaBank Research, a partir de datos de la EIA, el FMI y la Oficina Nacional de Estadística china.

Costes y beneficios del mix energético del futuro

La intensidad energética (relación entre la demanda o consumo energético y el producto interior bruto de un país): especialmente en los países desarrollados se ha reducido en los últimos años gracias a las mejoras tecnológicas obtenidas en eficiencia energética.

Por ejemplo, en España la intensidad energética en 2018 fue de 1,10 kWh por dólar americano invertido, con un PIB per persona de unos 40.257 dólares americanos, mientras que en Alemania la intensidad en el mismo año fue de 0,98 kWh/USD pero con un PIB de 53.487 USD/persona ó por ejemplo en Suiza en el mismo año la intensidad era de 0,60 kWh/USD con un PIB de 70.597 USD/persona, donde se observa como la eficiencia energética permite el crecimiento económico con un incremento reducido del consumo de energía.

Por otro lado, países en desarrollo como Sudáfrica con una intensidad energética de 2,11 kWh/USD y un PIB de 13.876 USD/persona, China con una intensidad energética de 2,13 kWh/USD y con un PIB de 15.134 USD/persona o Rusia con una intensidad energética de 2,32 kWh/USD y un PIB 26.656 USD/Persona indican como todavía el crecimiento está muy asociado a un mayor consumo energético por lo que sus demandas de energía crecerán si se quiere crecer económicamente. Este parámetro habrá que tenerlo en cuenta de forma determinante en el análisis de los escenarios del futuro.

Planificación en España

Según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 [25] diseñado por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico MITERD, la planificación de la capacidad instalada en el mix eléctrico va

a evolucionar según la gráfica XX donde se observa el gran crecimiento de la capacidad eólica (50,3 GW en 2030) y de la solar fotovoltaica (39,1 GW en 2030)



Figura 3. Evolución de la capacidad de generación en España acordada en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030.

Fuente: MITERND

Reseñar que el Plan incluye también los sistemas de respaldo que permitirán sustituir progresivamente al gas natural cuando no haya recurso solar o eólico suficiente. Estas tecnologías son el almacenamiento bien sea mediante sistemas de bombeo hidráulico mixto de las cuales ya había 16 en 2020 con 2,6 GW o bombeo hidráulico puro con 9 centrales que alcanzaban los 3,3 GW en 2020 y con un objetivo de 6,8 GW en 2030 o almacenamiento en baterías con un objetivo de 2,5 GW en 2030 [28].

Por último indicar que hay algunas tecnologías como la termosolar, en la que España es uno de los países líder, que produce energía eléctrica a partir de la radiación solar directa mediante la conversión en calor que se utiliza para convertir agua en vapor que actúa en una turbina para producir electricidad. Una característica de algunas de estas centrales es que pueden almacenar energía en forma de calor en inmensos tanques de sales fundidas. Hoy en día hay 18 centrales con esta capacidad de gestionar la energía e inyectar energía solar en la punta de demanda de la noche. (mas de 6 GWh de capacidad al almacenamiento)

Previsión de mix energético en Europa en 2050.

En Europa, se publicó el Energy Outlook 2050 en el que se propone reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre el 80 y el

95%. Para lograr este objetivo, como ya se ha comentado reiteradamente, la eficiencia energética es crucial. En 2050, el conjunto de las energías renovables deberían garantizar el suministro de dos tercios de la energía demandada.

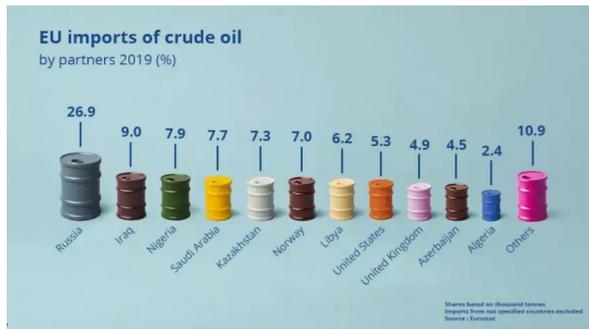
El problema está con el tercio restante, que incluye todas las tecnologías de generación de energía de respaldo. Pero para lograr estos objetivos, la transición a una economía descarbonizada tiene que considerarse prioritaria por parte de los distintos gobiernos que ostenten la responsabilidad de gobernar. La situación actual de altos precios del gas natural ha logrado que la energía se encuentre en la lista de prioridades de todos los gobiernos europeos debido a nuestra excesiva actual dependencia de dicha fuente de energía, en su gran mayoría importada, al no haber desplegado toda la capacidad renovable planificada. Pero a medida que se incorpora capacidad de producción basada en renovables, el consumo de gas natural en Europa está progresivamente reduciéndose.

En 2010, la demanda de gas natural en Europa era de 521 bcm (billion cubic meters = miles de millones de m³) mientras que en ésta última década no se han superado en ningún año los 400 bcm y en 2021 la demanda fue de 397 bcm. Pero el 80% de este gas natural se importa de terceros países (Rusia, EEUU, Argelia, Qatar, Egipto, etc.) bien sea mediante gasoductos o barcos gaseros con gas licuado que luego se gasifica en el puerto de destino. Alemania por ejemplo, consume alrededor de una cuarta parte del gas natural demandado en Europa (102 bcm en 2021).



Figura 4 y 5 Procedencia de las importaciones de gas natural y carbón en EU en 2019.

En cuanto al uso, un 40% de ese gas se utiliza en consumo residencial normalmente para calefacción, difícil de sustituir salvo mediante el uso masivo de biomasa, biocombustibles o geotermia.



El resto se usa industrialmente principalmente en centrales de ciclo combinado para producir electricidad y en centrales de cogeneración para producción combinada de calor industrial y electricidad.

Figura 6. Procedencia de las importaciones de petróleo en Europa (2019)

Las centrales de ciclo combinado se utilizan junto con las centrales hidráulicas como respaldo a las centrales renovables variables no gestionables (solar fotovoltaica y eólica principalmente). Al operar respaldando a estas, normalmente las centrales de gas de ciclo combinado operan muy pocas horas al año, (por debajo del 25%) lo cual hace que su viabilidad sea compleja.

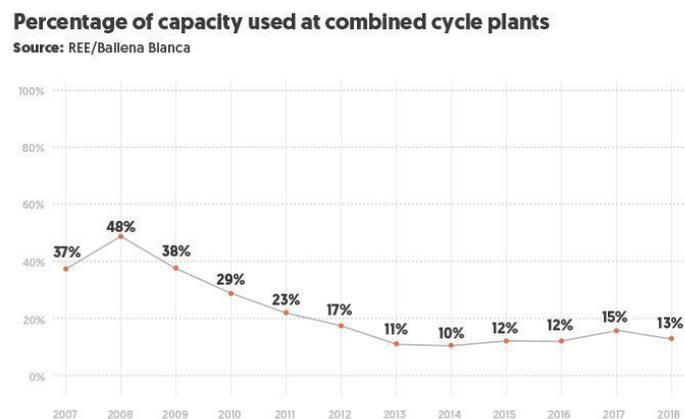


Figura 7. Porcentaje del tiempo de uso de las centrales de ciclo combinado de gas en España (2007-2018) Fuente REE/Ballena Blanca.

En la medida que aumente la capacidad renovable, la capacidad de las centrales de gas se irá progresivamente reduciendo salvo que haya un aumento de demanda de energía o una reducción de la energía renovable por ejemplo debido al efecto de la sequía en la producción hidroeléctrica o reducción imprevista del recurso eólico. La energía solar en principio es más predecible y por ello se prevé un gran aumento de la capacidad solar fotovoltaica principalmente y en algunos países también de la solar térmica de concentración. En cualquier caso la dependencia de fuentes energéticas que a su vez dependen de las condiciones

meteorológicas, que a su vez dependen de la evolución climática hace que todo esté vinculado.

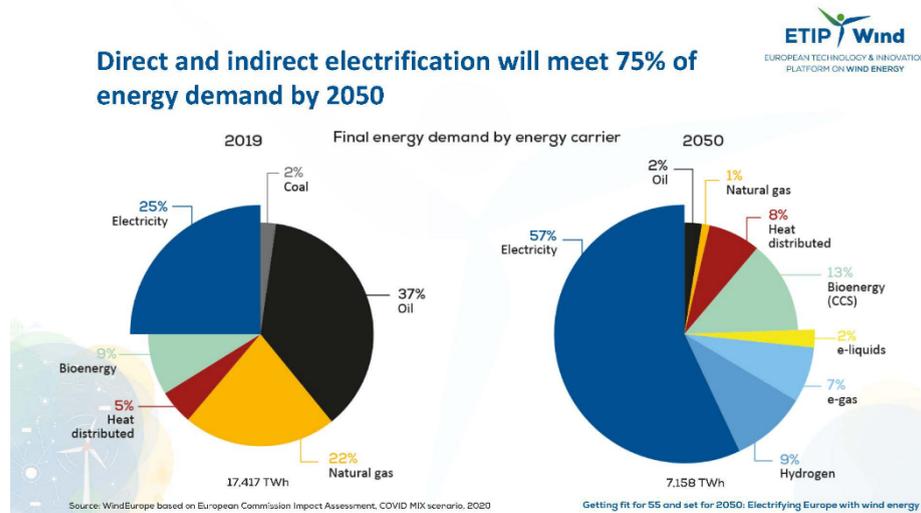


Figura 8. Mix europeo de vectores de energía primaria en 2019 frente a lo esperado en 2050 según la propuesta Fit for 55 de la CE. Fuente: ETIPwind. (Del 61% a solo un 3% de combustibles fósiles!!)

Está claro que en todos los escenarios previstos para 2050, la demanda de energía total va a crecer. La principal razón va a ser el incremento de la población hasta 9.000 o 10.000 millones de personas. (Ahora hay casi 8000 millones de personas viviendo en la tierra).

Por lo tanto, el consumo de combustibles fósiles especialmente gas natural con gran probabilidad va a seguir siendo importante ya que si su precio sube permitirá hacer rentables a los yacimientos más complejos en tierra (explotaciones de petróleo y gas de esquisto mediante técnicas de fractura hidráulica) o en el mar en instalaciones marinas cimentadas o flotantes. De cara a cumplir los compromisos de descarbonización cada vez se desarrollarán más técnicas competitivas de secuestro, almacenamiento y uso del CO2 en lugar de emitirlo. La aportación de los reactores nucleares de fisión se mantendrá casi similar a la capacidad actual ya que habrá países que puedan permitirse abandonar esa tecnología al tener fuentes sustitutivas pero en otros casos no será posible. Probablemente la tecnología avance hacia minireactores de última generación, con tiempos de construcción menores que los actuales, más modulares y competitivos.

En cuanto a las fuentes renovables la solar fotovoltaica va a crecer de forma incesante tanto integrada en cubiertas como en centrales de gran potencia y la energía eólica tanto en tierra como en mar también crecerá de forma significativa, cubriendo entre ambas más del 60% de la

demanda de energía primaria. No debemos olvidar que para lograr ese nivel de integración, el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía será totalmente necesario.

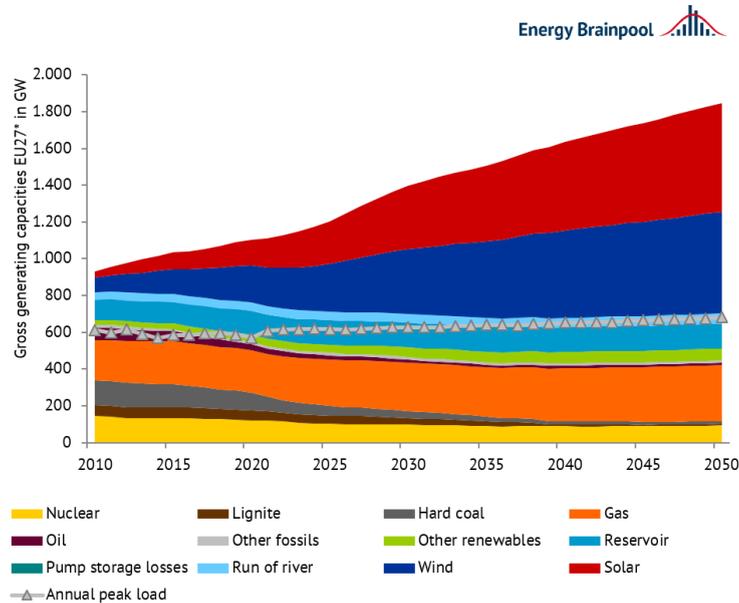


Figura 9. Evolución de la capacidad de generación de energía primaria en la EU 27 (en GW). Fuente Energy brainpool

Escenarios previstos para Europa en 2050

Para establecer las parametrizaciones de los modelos de simulación se establecen distintos escenarios. Por ejemplo, escenarios de alta eficiencia, escenarios con competencia abierta entre tecnologías, escenarios con alta implantación de energía renovables, escenarios con retrasos en la tecnología de secuestro, almacenamiento y uso del CO₂, o escenarios con bajo despliegue de la tecnología nuclear de fisión.

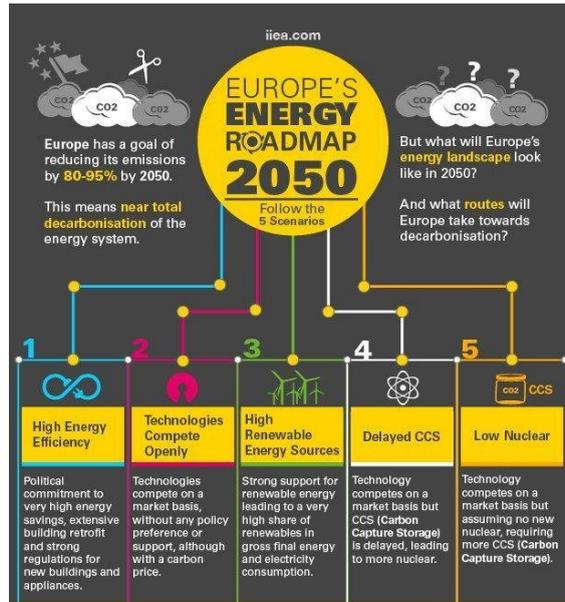


Figura 10. Hoja de Ruta energía 2050 en Europa. Escenarios. Fuente: IIEA

Previsión de mix energético en el Mundo en 2050.

Prever la hoja de ruta hacia el mix energético mundial no es tarea fácil, pero para realizar la necesaria planificación se requieren simulaciones con distintos escenarios

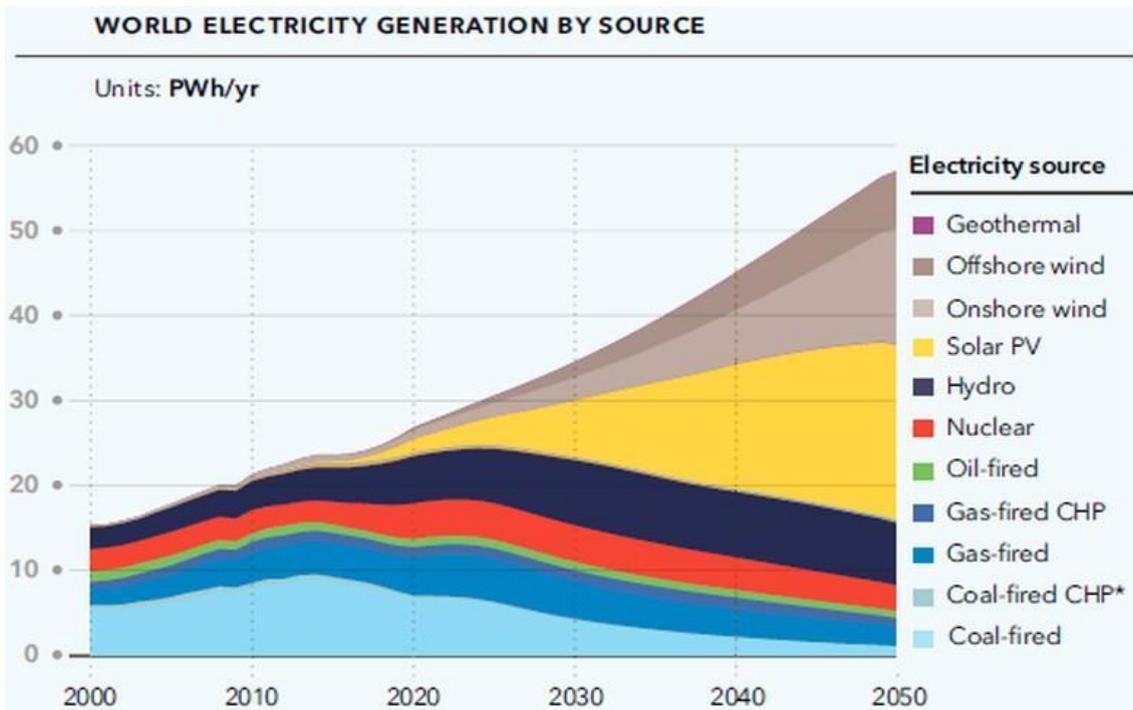


Figura 11. Evolución de la generación eléctrica mundial distribuida por fuentes energéticas hasta 2050 (PWh/Año, 1 Peta = 10^{15})

En 2019, el World Energy Council (WEC) presentó una serie de escenarios seleccionados como rutas exploratorias para la gran transición. La orientación de los escenarios seleccionados está determinada principalmente por la tendencia política predominante:

- El primer escenario denominado “Modern Jazz-MJ” sigue un enfoque impulsado por el mercado. Se presupone un mundo altamente productivo, con rápido crecimiento económico y fuerte desarrollo. Innovación tecnológica habilitada digitalmente y nuevos modelos de negocio abordan la sostenibilidad.
- El segundo escenario denominado “Unfinished Symphony-US” sigue un enfoque impulsado por el gobierno para lograr la sostenibilidad a través de la cooperación internacional. Se asume una extensa red de incentivos fiscales como subsidios verdes y precios del carbono convergentes y efectivos en las diferentes partes del mundo.

Por último, el escenario denominado “Hard Rock-HR” en el cual los intereses nacionales impiden que los países colaboren efectivamente a nivel global, con atención limitada a abordar el cambio climático. Las tecnologías son obligatorias en función de la disponibilidad de los recursos locales. El proteccionismo más que el libre comercio domina la escena.

El Instituto Paul Scherrer, mediante un proceso de consulta a expertos redactó los guiones de cada escenario y los cuantificó mediante el modelo Global Multi-regional MARKAL (GMM).

Global Multi-regional MARKAL model (GMM)

- Represents in detail the energy system of a region from resource extraction to energy end uses
- Includes more than 400 technologies with their technical-economic characteristics
- Cost optimization of the energy system over the period of 2010 – 2100
- Non-cost and behavioral assumptions are modeled as side-constraints

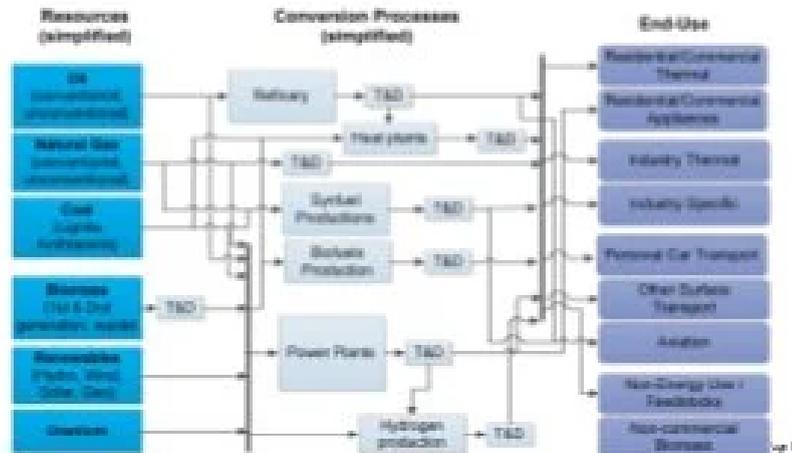


Figura 12. Modelo global multirregional MARKAL (GMM). (Fuente World Energy Council (WEC) & Paul Scherrer Institute)

Los principales supuestos de los tres escenarios del WEC se incluyen en la tabla a continuación

Main assumptions of the three WEC scenarios

	Modern Jazz	Unfinished Symphony	Hard Rock
Goals	• Open economies • Affordable energy for all	• Global convergence • Climate focused policies	• Fragmented economies • Energy security policies
Economic growth	GDP growth: 3.3% p.a	GDP growth: 2.9% p.a	GDP growth: 1.7% p.a
Population	Global population reaches 10 billion by 2060		
Energy efficiency	Increases based on markets	Promoted by governments	Reflects historical trends
Unconv. oil & gas	Expanded opening of markets	Regulation (for water use, market access)	Expanded due to energy security policies
Renewables	• Wind & solar supported • Hydro limited support	Climate change mitigation policies promote renewables	Energy security policies drive renewables
Nuclear & CCS	Low acceptance by markets and consumers	Climate change mitigation policies favor them	Energy security policies drive nuclear deployment
Electric vehicles	R&D on batteries decreases costs	Climate change mitigation policies favor them	Not a priority

Figura 12. Principales suposiciones aplicadas en los escenarios del modelo WEC (Fuente: World Energy Council (WEC) & PS Institute)

El modelo se basa en supuestos de entrada que reflejan los argumentos del escenario y determinan las configuraciones de menor coste del sistema energético global desde la perspectiva de un planificador social con perfecta previsión. El modelo GMM representa el sistema energético global desagregado en 17 regiones del mundo, incluidas las características específicas de cada región de oferta y demanda de energía, así como el correspondiente CO2 emisiones. La evolución de los factores clave del escenario se expresa en forma coherente mediante líneas argumentales de los futuros desarrollos económicos y sociales. La iteración entre el desarrollo de las narrativas y su cuantificación proporcionó la base para un poderoso conjunto de escenarios.

El modelo GMM representa en detalle el sistema energético de una región

desde la el origen de los recursos hasta los usos finales de la energía

En los tres escenarios, se supone una desaceleración del crecimiento de la población, con un aumento en comparación con hoy en un tercio a 10 mil millones para 2060

Global power generation by scenario

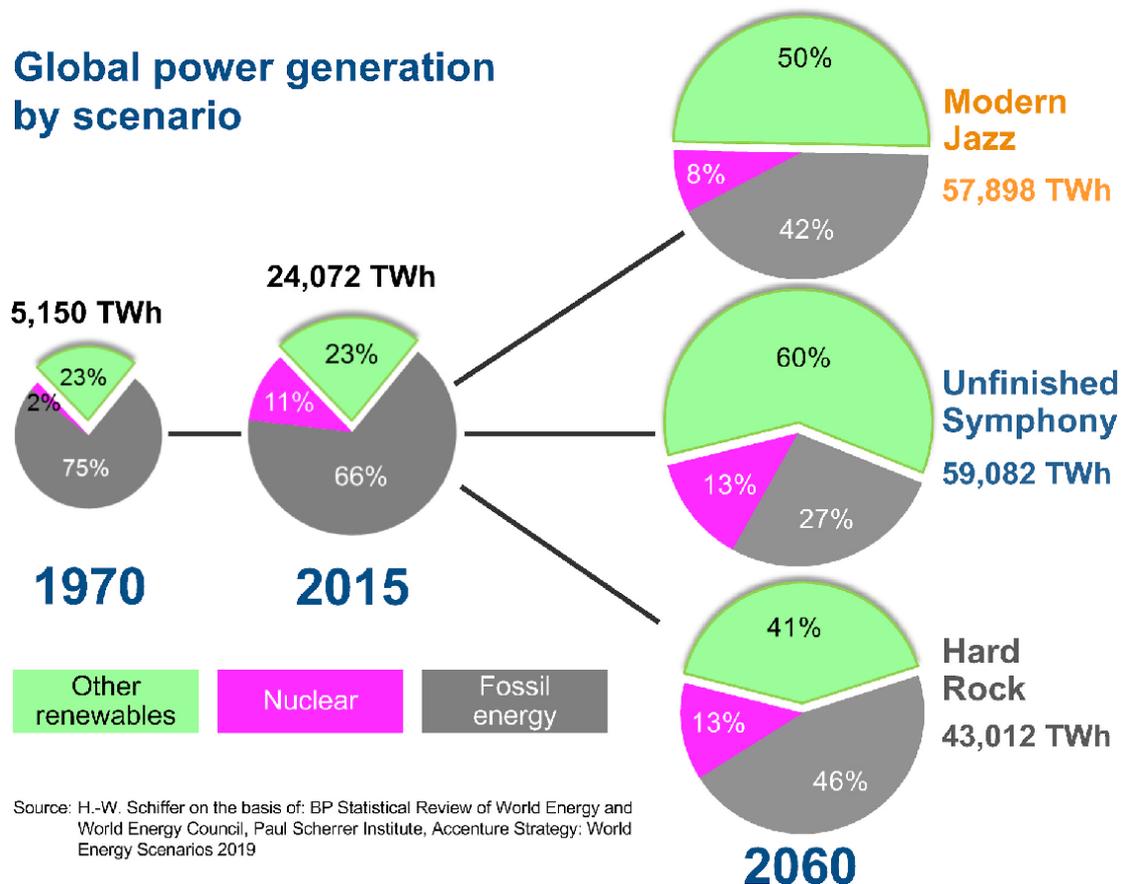


Figura 14. Generación global por escenarios. (Fuente: World Energy Council (WEC), BP, Paul Scherrer Institute, Accenture).

Generación de energía global por escenario.

En 2015, la cuota de energías renovables en la generación total de energía era del 23%, la misma cifra que en 1970. Para las próximas décadas, los tres escenarios del WEC muestran un fuerte aumento en la participación de las energías renovables en la generación total de electricidad, con un rango de 41-60% para 2060 dependiendo del escenario. A nivel mundial, la contribución adicional de las energías renovables es suficiente para cubrir casi todo el crecimiento de la demanda de electricidad esperada en 2060.

En los tres escenarios del WEC, la producción de electricidad a partir del carbón disminuye hacia 2060, mientras aumenta la cuota de gas

En los escenarios MJ y US, las plantas de carbón no son competitivas frente a la energía solar fotovoltaica y la energía eólica a largo plazo en la mayoría de las regiones debido a la aplicación de mecanismos de apoyo a la política climática y la disminución de los costes de producción de las tecnologías renovables como resultado de la I+D y la innovación gracias a esquemas de apoyo tecnológico. Las nuevas inversiones en centrales nucleares se concentran en países de Asia, como China, India, Medio Oriente y también en algunos países europeos, en particular Rusia. Este desarrollo sigue el supuesto de que las políticas nucleares restrictivas como las implementadas en algunos países ahora continuará (por ejemplo, la eliminación nuclear en Alemania, Bélgica y otros países europeos), así como el crecimiento de la capacidad nuclear en América del Norte y del Sur está asociado a los desafíos sociales y costes.

El aumento de la energía solar y eólica observado en los últimos años continúa a un ritmo sin precedentes, en particular en el escenario MJ y US. En línea con la fuerte disminución de la curva de aprendizaje tecnológica de la última década, se asume en estos dos escenarios que los costes específicos de inversión en energía solar fotovoltaica van a reducirse a la mitad en las próximas dos o tres décadas, mientras que el declive en el escenario HR es solo del 20 al 25%. En el escenario US el apoyo gubernamental también impulsa las tecnologías renovables. La generación de energía basada en energía solar (2015: 256 TWh) crece más de quince veces en el escenario HR, más de treinta veces en MJ y más de cincuenta veces en US para 2060.

La generación de energía mundial a partir de la eólica (2015: 840 TWh) se multiplica por cinco en el escenario HR y MJ y por más de diez en US para 2060.

Dependiendo del escenario, la energía hidroeléctrica sube entre 65% y 100% hasta 2060, en comparación con 2015. La capacidad en el

escenario US supone que los gobiernos facilitan el despliegue de proyectos hidroeléctricos a gran escala como opción competitiva de mitigación del cambio climático. A pesar del crecimiento de capacidad absoluta, la participación de la energía hidroeléctrica en la generación de energía disminuye ligeramente porque la generación total de energía crece a un ritmo mayor. Sin embargo, la energía hidroeléctrica, además de la eólica y la solar, sigue siendo uno de los pilares de energía renovable utilizada para la generación de energía. La generación de energía basada en biomasa sube en un factor de 4–5 desde los niveles de 2015 para 2060 con similar nivel de producción en los dos escenarios MJ y US. Este desarrollo conduce a un aumento en la proporción de biomasa en la producción total de electricidad del 2% en 2015 a alrededor del 5% en 2060. A pesar de una fuerte tasa de crecimiento, la contribución de la energía geotérmica y otras energías renovables se limita al 1% de la generación total de energía para las próximas décadas. Esto no es solo porque la geotermia es muy dependiente de la ubicación siendo su mayor potencial en el área de Asia-Pacífico, sino también porque los costes para producir electricidad varían significativamente dependiendo de la tecnología. Para sistemas geotérmicos mejorados con alta disponibilidad de la planta, se asumen costes de inversión de alrededor de ocho veces de los de la energía solar fotovoltaica.

Comparison of different global energy scenarios Global power generation 2018 to 2040 in TWh

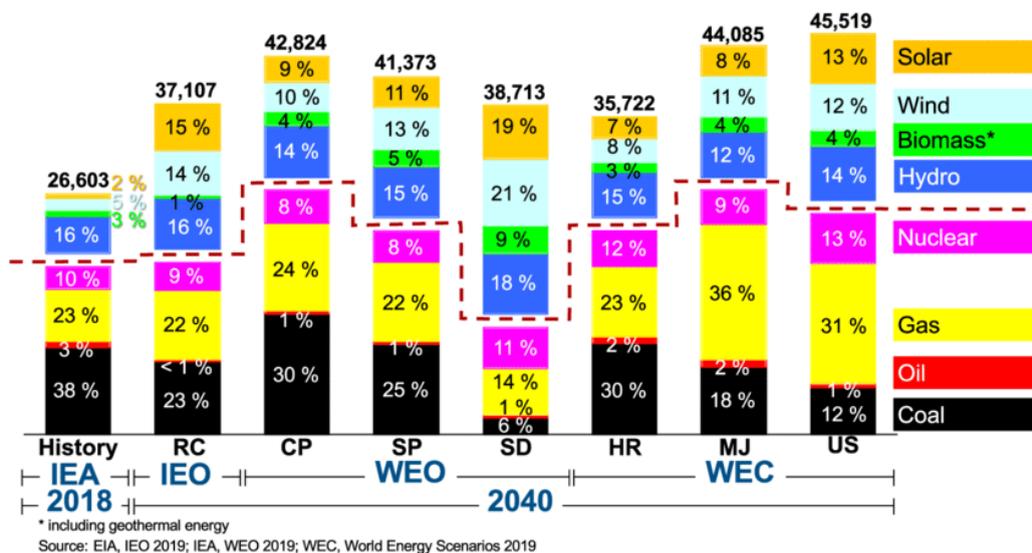


Figura 15: Tabla comparativa de los resultados obtenidos en el mix energético mundial en varios estudios y escenarios entre 2018 y 2040

En este modelo también se aplican escenarios para la movilidad y para nuevas técnicas de descarbonización como el secuestro, almacenamiento y uso del CO2

Por último indicar que hay múltiples modelos además del comentado, con diferentes escenarios como son el modelo de la Agencia Internacional de la Energía IEA desarrollado con la herramienta TIMES, el modelo IEO (International Energy Outlook) de la US EIA Administración de Estados Unidos para la Información Energética.

También empresas energéticas como Shell (Shell Sky escenario), British Petroleum (BPs Energy Outlook), Exxon Mobil (Outlook for energy) o la noruega Equinor.

En España, además del PNIEC 2021-2030 desarrollado por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Social, existen estudios de compañías energéticas como Repsol.

Obviamente, todos estos estudios requieren de actualización cuando alguna de las variables de entrada sufre un cambio significativo, como por ejemplo conflictos globales que pueden cambiar la estructura de costes y de acceso a suministros de forma drástica

Preguntas y cuestiones de debate.

En éste apartado os propongo una serie de preguntas y cuestiones para que iniciéis una exploración en busca de algún descubrimiento que os permita decidir de forma objetiva vuestra respuesta.

- ¿Conoces el mix de fuentes de energía que utilizamos en España en la actualidad? ¿Sabes cuál es el porcentaje de energías sin emisiones?
- La mayoría de la capacidad es eólica y solar fotovoltaica, ¿qué otras fuentes crees que van a despegar en los próximos años? Fuentes oceánicas, geotermia, nuevos biocombustibles.... ¿Conoces el estado de madurez tecnológica y de costes de producción de cada una de ellas?
- Qué factores crees que serán decisivos en el mix energético del futuro en España, en Europa y en el Mundo. ¿Crees que habrá diferencias significativas entre ellos?
- ¿Conoces cuál es el mix energético previsto para España en el año 2030?
- ¿Conoces el mix energético previsto para España en el año 2050?
- ¿Cómo crees que puede afectar el actual alto precio del gas natural en los objetivos de descarbonización en España?
- ¿Cómo crees que puede afectar el bajo precio del carbón en los objetivos de descarbonización?
- Crees que hay futuro para las centrales alimentadas con combustibles fósiles, si se puede secuestrar el CO₂ producido y almacenar o utilizar de forma competitiva? ¿Cómo crees que se puede almacenar o utilizar?

- ¿Crees que es posible generar toda la energía que se consumirá en España en 2050 con energías renovables?
- ¿Crees que la energía nuclear de fisión es una solución de futuro? Los reactores de nueva generación pueden ser la solución?
- ¿Crees que la energía nuclear de fusión puede ser competitiva en 2060? ¿Qué tecnología de fusión crees que será la que se desarrolle comercialmente?Cuál será en tu opinión el papel de las energías renovables si esta tecnología madura?
- ¿Qué tecnologías conoces que pueden ayudarnos a abandonar el gas natural como fuente de energía de respaldo? El almacenamiento hidráulico reversible? ¿Las baterías de iones de litio? El almacenamiento en hidrógeno? Un mix coordinado de sistemas de almacenamiento y gestión?
- Crees que el progresivo cambio climático puede afectar a las condiciones meteorológicas y por lo tanto a las fuentes de energía renovables dependientes de dichas condiciones.
- Que áreas de investigación consideras que son prioritarias para alcanzar el mix previsto en 2050.
- ¿Conoces la forma de asignar precio horario a la energía eléctrica en el mercado mayorista en España? Se llama mercado marginalista, ¿sabes por qué?

Bibliografía.

Recursos disponibles relacionados con el tema en la base de datos en INVESTIGA I+D+i correspondiente a anteriores ediciones (<http://www.programainvestiga.org>):

- Guía introductoria al tema "**La energía eólica marina flotante**" (Edición 2021-2022).
- Guía introductoria al tema "**El uso de la energía eléctrica como base del funcionamiento de la actividad económica**" (Edición 2020-2021).
- Guía introductoria al tema '**La Energía Eólica marina**' (Edición 2019-2020).

- Guía introductoria al tema “**La movilidad eléctrica es la clave del modelo cero emisiones?**” (Edición 2018-2019).
- Guía introductoria al tema “**Generación Distribuida**” (Edición 2017-2018).
- Guía introductoria al tema “**Vehículo eléctrico o vehículo a hidrógeno. Una decisión estratégica**”(Edición 2015-2016)
- Guía introductoria al tema “**CO2 y Cambio Climático**” (Edición 2016-2017).
- Guía introductoria al tema “**Combustibles para el futuro**” (Edición 2011-2012).
- Guía introductoria al tema “**Almacenamiento de Energía**”. (Edición 2010-2011).

Global

- 1) Naciones Unidas. Plataforma NAZCA sobre estrategia de cambio climático (Español)
<https://unfccc.int/es>
- 2) IEA: Net Zero by 2050. A roadmap for the global energy sector (Inglés)
https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
- 3) Agencia Internacional de la Energía. Informe estadístico. “Key World Energy Statistics 2020” (En Inglés)
https://iea.blob.core.windows.net/assets/1b7781df-5c93-492a-acd6-01fc90388b0f/Key_World_Energy_Statistics_2020.pdf
- 4) IRENA (2020). Global Renewables Outlook. Energy Transformation 2050 (Inglés)
<https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>
- 5) IRENA (2018) Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf
- 6) Información intensidad energética de los distintos países
<https://ourworldindata.org/grapher/energy-intensity-vs-gdp?tab=table&country>
- 7) Electricity Map <https://app.electricitymaps.com/map> (Español)
- 8) <https://ourworldindata.org/energy-mix> (Inglés)

- 9) <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (Inglés)
- 10) ENERDATA World Energy and Climate Statistics. Yearbook 2022
<https://yearbook.enerdata.net/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>
- 11) ESCENARIOS DE FUTURO World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050 Project Partner Paul Scherrer Institute (PSI), Switzerland
https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Scenarios_Composing-energy-futures-to-2050_Executive-summary.pdf

EEUU

- 12) El plan de Joe Biden para lograr su objetivo de descarbonizar la economía
<https://www.carbono.news/politica/lo-que-propone-biden-para-descarbonizar-la-economia/>
- 13) Proyecciones de la Administración de Información de Energía de EEUU (EIA, US Energy Information Administration), (En inglés) <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>

China

- 14) China desvela su plan de descarbonización para 2060
<https://energynews.pro/es/china-desvela-su-plan-de-descarbonizacion/#:~:text=Para%202030%2C%20se%20espera%20que,25%25%20con%20respecto%20a%202020.>
- 15) <https://elpais.com/sociedad/2020-09-22/china-promete-en-la-onu-un-plan-para-alcanzar-la-neutralidad-del-carbono-en-2060.html>

Reino Unido

- 16) The UK's future energy mix. What will it look like if we're to reach Net Zero?
<https://www.imperial.ac.uk/stories/future-energy/>

Europa

- 17) De donde viene nuestra energía en la UE? (Español)
<https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2a.html?etrans=es>
- 18) Respuesta de la UE al Cambio climático.
[https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/priorities/cambio-climatico/2018-0703STO07129/respuestas-de-la-ue-al-cambio-climatico?xtor=SEC-169-GOO-\[Climate Change\]-\[Responsive\]-S-\[pacto%20verde%20europeo\]](https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/priorities/cambio-climatico/2018-0703STO07129/respuestas-de-la-ue-al-cambio-climatico?xtor=SEC-169-GOO-[Climate Change]-[Responsive]-S-[pacto%20verde%20europeo])
- 19) Energy BrainBlog
<https://blog.energybrainpool.com/en/eu-energy-outlook-2050-how-will-europe-evolve-over-the-next-30-years-3/>

- 20) The POTEnCIA Central scenario: an EU energy outlook to 2050
file:///C:/Users/admin/Downloads/potencia_central_scenario_online.pdf
- 21) Pacto Verde Europeo / EU Green Deal
https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es
- 22) Energía y Pacto Verde Europeo
https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_es (Inglés)
- 23) National energy and Climate Plans
https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_es (Inglés)
- 24) EU Energy Roadmap 2050
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf

España

- 25) Plan Nacional Integrado de Energía y Clima PNIEC 2021-2030 desarrollado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Documento completo)
<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>
- 26) Red Eléctrica Española. <https://www.ree.es/es/datos/generacion> (Español)
- 27) Borrador de la Estrategia de Descarbonización a largo plazo 2050
<https://energia.gob.es/es-es/participacion/paginas/detalleparticipacionpublica.aspx?k=336>
- 28) ANALISIS DE POSIBILIDADES DE RESPALDO CON ALMACENAMIENTO EN ESPAÑA
<https://www.norvento.com/wp-content/uploads/2022/01/Articulo-Pumped-Energy-Storage-Past-Present-and-Future.pdf>

VIDEOS

- 1) ¿Cómo funciona la red eléctrica española? (Español, 2018)
<https://www.youtube.com/watch?v=KqdXQ8OPx6g>
- 2) Red Eléctrica de España, operador y transportista único del sistema eléctrico español (Español, 2021)
https://www.youtube.com/watch?v=KLpK8U_lyoc
- 3) Así trabaja el cerebro de la red eléctrica (Español, 2012)
https://www.youtube.com/watch?v=9Izj_XPPBO4
- 4) Planificación eléctrica 2021-2026 (Español)

- <https://www.youtube.com/watch?v=sPGZdWBUqh8>
- 5) La Planificación eléctrica y el desarrollo de la eólica marina (Español)
<https://www.youtube.com/watch?v=d31pDdkFbAO>
 - 6) The Global Energy Mix: Past, Present and Future (Inglés, 2021)
<https://www.youtube.com/watch?v=jH7qEfTCqh0>
 - 7) Spain 2021: Energy Policy Review (IEA Inglés 2021)
<https://www.youtube.com/watch?v=AK5kBuChobY>
 - 8) Que es la descarbonización BBVA (Español, 2021)
<https://www.youtube.com/watch?v=koi7RSKRnDo>
 - 9) ¿Sabes que tipo de Energía usaremos en el año 2050? (Español 2012)
<https://www.youtube.com/watch?v=kM6wovVdiCQ>
 - 10) Soñar el futuro - Energía en el 2050 | Documentales Completos en Español (2018)
<https://www.youtube.com/watch?v=aOVR3R6aH0g>
 - 11) 100% de Energía Renovable En El Mundo Para 2050 (Español 2020)
<https://www.youtube.com/watch?v=NzxGgDM1Clw>
 - 12) 7 formas de almacenar la ENERGÍA RENOVABLE del futuro (Español, 2020)
<https://www.youtube.com/watch?v=sQNwqgjp4bg>
 - 13) Cómo funciona la energía hidroeléctrica de bombeo 3D (Español, 2021)
<https://www.youtube.com/watch?v=e-hmizf5DXg>
 - 14) Central Hidroeléctrica de Bombeo | Gouvães, Proyecto Tâmega (Español 2021)
<https://www.youtube.com/watch?v=KlzZI7VQKp8>
 - 15) El futuro será hidrógeno verde | Proyectos Reales España (Español 2021)
<https://www.youtube.com/watch?v=js4IxsISEZU&list=RDCMUcYKcHUWnubyOfiSUAXbn-IQ&index=6>
 - 16) Hidrógeno verde: ¿puede ser España el Qatar de la energía del futuro? (Español 2022)
https://www.youtube.com/watch?v=Ymqp9kR_xB8