



GRADO EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis comparativo de los diferentes tipos de
energías renovables y propuesta del mix energético
óptimo para España

Autor: Alberto Pasarón Martín-Mendiluce

Director: David Hernández García

Madrid

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ENERGÍAS RENOVABLES Y PROPUESTA DEL MIX ENERGÉTICO ÓPTIMO PARA ESPAÑA

Autor: Pasarón, Alberto.

Director: Hernández, David.

Entidad Colaboradora: ICAI – ICADE

Abstract (español)

Este documento analiza una variedad de tecnologías de energía renovable utilizando factores como eficiencia, sostenibilidad y potencial de crecimiento. Se destaca la importancia de cada tecnología en el contexto de un futuro energético sostenible a través de comparaciones detalladas. Se toman en cuenta factores técnicos, ambientales, financieros y regulatorios, lo que ofrece una visión completa del estado actual y las perspectivas de las energías renovables. Además, se propone un mix energético óptimo en España teniendo en cuenta diferentes criterios.

Abstract (inglés)

This paper analyzes a variety of renewable energy technologies using factors such as efficiency, sustainability and growth potential. The importance of each technology in the context of a sustainable energy future is highlighted through detailed comparisons. Technical, environmental, financial and regulatory factors are taken into account, providing a comprehensive overview of the current status and prospects for renewable energy. In addition, an optimal energy mix in Spain is proposed taking into account different criteria.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Motivación	5
1.2 Objetivos	6
Capítulo 2. Estado del Arte.....	7
2.1 Introducción a la energía	7
2.2 Introducción a las diferentes tecnologías energéticas.....	10
2.2.1 Energías renovables	11
2.2.2 Energías no renovables	12
2.3 El consumo energético mundial y su evolución histórica	13
2.3.1 Situación actual de la demanda energética a nivel mundial.....	14
2.3.2 Mix energético de los países más representativos.....	16
Capítulo 3. Análisis comparativo	18
3.1 Definición del perímetro de estudio	18
3.1.1 Detalle de las tecnologías energéticas a estudiar	18
3.1.2 Definición de los criterios comparativos.....	28
3.2 Metodología.....	29
3.3 Resultados	30
3.3.1 Eficiencia.....	30
3.3.2 Criterio económico.....	32
3.3.3 Riesgos.....	33
3.3.4 Sostenibilidad	34
3.3.5 Potencial de crecimiento	36
3.4 Síntesis de resultados.....	37
Capítulo 4. Mix óptimo para España.....	39
4.1 Contexto energético en España	39
4.1.1 Contexto político	40
4.1.2 Estado energético actual	41
4.2 Propuesta del mix energético óptimo	43
4.2.1 Papel de la energía nuclear.....	44
4.2.2 Limitaciones de las energías renovables.....	45

<i>4.2.3 Propuesta de mix.....</i>	<i>47</i>
<i>Capítulo 5. Conclusiones.....</i>	<i>50</i>
<i>Capítulo 6. Bibliografía.....</i>	<i>51</i>
ANEXO I	54

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Procesos de transformación de la energía primaria hasta la obtención de la denominada "energía de uso final". (Fuente: [2]).....	8
Ilustración 2. Relación entre el consumo energético y el PIB por países (Fuente:[4])	10
Ilustración 3. Evolución del consumo energético mundial desde su aparición. (Fuente: [6])	13
Ilustración 4. Diagrama Sankey de los flujos de energía dividido por las principales industrias. (Fuente [8])	15
Ilustración 5. Mix energético de los países del G20 en 1965. (Fuente: [11] vía Visual Capitalist)	16
Ilustración 6. Mix energético de los países del G20 en 2020. (Fuente [11] vía Visual Capitalist)	16
Ilustración 7. Imagen de planta solar fotovoltaica. (Fuente: [13])	19
Ilustración 8. Funcionamiento de una planta de energía solar térmica. (Fuente[15])	20
Ilustración 9. Partes de un parque fotovoltaico terrestre. (Fuente [17])	21
Ilustración 10. Partes de una central hidroeléctrica. (Fuente:[19]).....	23
Ilustración 11. Ciclo de funcionamiento de una central geotérmica. (Fuente: [20]).....	24
Ilustración 12. Esquema de una central de biomasa. (Fuente: [22]).....	26
Ilustración 13. Generador de corriente de marea. (Fuente: [24])	27
Ilustración 14. Tabla comparativa del rendimiento de las principales tecnologías de energías renovables. (Fuente: Elaboración propia).....	30
Ilustración 15. Comparación de la consistencia de las diferentes tecnologías. (Fuente: Elaboración propia)	31
Ilustración 16. Tabla comparativa de costes de inversión y LCOEs de las principales tecnologías. (Fuente: Elaboración propia).....	32
Ilustración 17. Tabla ilustrativa de los principales riesgos que afectan a las tecnologías. (Fuente: Elaboración propia).....	34
Ilustración 18. Tabla de grado de sostenibilidad de las tecnologías. (Fuente: Elaboración propia).....	35

Ilustración 19. Tabla comparativa de potencial de expansión de las tecnologías. (Fuente: Elaboración propia)	36
Ilustración 20. Tabla resumen del análisis comparativo de las tecnologías. (Fuente: Elaboración propia)	37
Ilustración 21. Diagrama Sankey de la energía en España. Cifras en ktep. (Fuente: [28]).	39
Ilustración 22. Objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030. (Fuente: [30])	40
Ilustración 23. Consumo de energía primaria en España. (Fuente: [28])	42
Ilustración 24. Cobertura de la demanda energética. (Fuente: [36])	42
Ilustración 25. Tendencia de la demanda total de electricidad en España en los últimos años. (Fuente: [36]).....	43
Ilustración 26. Desglose de costes de generación. (Fuente:[35])	45
Ilustración 27. Sensibilidad ante el aumento del precio del combustible. (Fuente: [35]) ...	45
Ilustración 28. Tabla desglose de mix energético actual vs óptimo. (Fuente: Elaboración propia).....	48
Ilustración 29. Gráfico de mix energético óptimo. (Fuente: Elaboración propia).....	49

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una introducción de este proyecto despertando el interés del lector por el proyecto y describiendo la motivación del mismo.

1.1 MOTIVACIÓN

La motivación detrás de este proyecto está fundamentada por la necesidad actual de evolucionar hacia fuentes de energías renovables (transición energética). Las principales fuentes de energía han sido durante muchos años las tecnologías tradicionales basadas en combustibles fósiles, como el carbón o el gas. El problema de este tipo de tecnologías es el alto grado de emisión de gases de efecto invernadero que presentan, derivando en graves consecuencias para el medio ambiente.

La principal consecuencia producida por este tipo de gases es el cambio climático – la variación global del clima de la Tierra. En caso de que no se tomen medidas para aminorar este cambio climático, el impacto potencial sería enorme, con predicciones de falta de agua potable, grandes cambios en las condiciones para la producción de alimentos y un aumento en los índices de mortalidad debido a inundaciones, tormentas, sequías y olas de calor [1]. Por otra parte, este tipo de gases contaminantes pueden afectar de forma directa a la salud de las personas en forma de problemas respiratorios principalmente.

Por consiguiente, las energías renovables, con su nula emisión de gases de efecto invernadero, se han convertido en la alternativa más viable y sostenible a las tecnologías tradicionales basadas en combustibles fósiles. Entre los principales tipos de energías renovables destacan la solar, la eólica, la hidroeléctrica, la de biomasa y la geotérmica.

Sin embargo, actualmente no están tan avanzadas como para reemplazar la totalidad de las tecnologías tradicionales. De ahí que surja el concepto de “transición energética” hacia este tipo de energías “verdes”. Hasta que se complete esta transición energética aparece otro tipo de energía que es crucial en este proceso de cambio, la energía nuclear. Esta última

contamina considerablemente menos que las tecnologías que utilizan combustibles fósiles (más adelante se hará más hincapié en esta forma de producción de energía).

En resumen, la motivación de este proyecto se basa en la necesidad urgente de transitar hacia un modelo energético que esté fundamentado por energías renovables; así como aportar un mix energético para España que sea óptimo, según los criterios que se presentarán más adelante.

1.2 OBJETIVOS

- i) Analizar la situación actual del sector de las energías renovables, mediante un análisis técnico-comparativo de las diferentes tecnologías existentes.
- ii) Estudiar la composición del mix energético actual en España
- iii) Realizar una propuesta de mix energético óptimo para España, analizando los siguientes aspectos:
 - a. Económicos
 - b. De eficiencia
 - c. De sostenibilidad
 - d. De riesgos
 - e. Políticos
- iv) Realizar proyecciones de futuro para el sector de la energía renovable, centrándose en España.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo trata de dar una visión general de la situación energética a nivel global. Primero se explicarán conceptos básicos relacionados con la energía, para más tarde dar un contexto acerca del consumo energético mundial y su evolución histórica. Finalmente se introducirán las tecnologías disponibles de producción de energía. De esta forma se proporcionará un contexto inicial para que el lector parta con la base de conocimiento necesaria para comprender adecuadamente el resto del proyecto.

2.1 INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA

La energía se puede definir como la capacidad de realizar un trabajo o causar un cambio. Es una propiedad física fundamental que se manifiesta en varias formas y puede transferirse de una forma a otra, pero nunca se crea ni se pierde, según el principio de conservación de la energía.

La energía juega un papel fundamental en todas las actividades diarias y procesos naturales. Es esencial para el funcionamiento de las máquinas, el transporte, la iluminación, la calefacción, la refrigeración, la producción industrial y muchas otras aplicaciones.

Es importante diferenciar entre energía primaria y energía secundaria:

- **Energía primaria:** Es la que se obtiene directamente de las fuentes en origen, sin sufrir ningún tipo de transformación. Ejemplos destacables serían el petróleo, gas natural, viento, sol, etc.
- **Energía secundaria:** Es la que se obtiene del procesamiento o transformación de la energía primaria, es decir, la que se le suministra al consumidor y que, por tanto, implica transporte y distribución. Ejemplos de energía secundaria son la electricidad, los combustibles derivados (gasolina o diésel), el GLP, etc.

Además, se puede llegar a considerar otra denominación de la energía, la “energía de uso final”, es decir, la empleada directamente por el usuario, pero con cierta transformación. En otras palabras, la que se utiliza después de haber sido convertida y transportada desde su fuente original (la utilizada en las industrias, nuestros hogares, el transporte, etc.). Un claro ejemplo sería la energía de los coches, que utiliza gasolina para producir energía cinética y térmica. La siguiente ilustración representa los conceptos recientemente definidos [2].

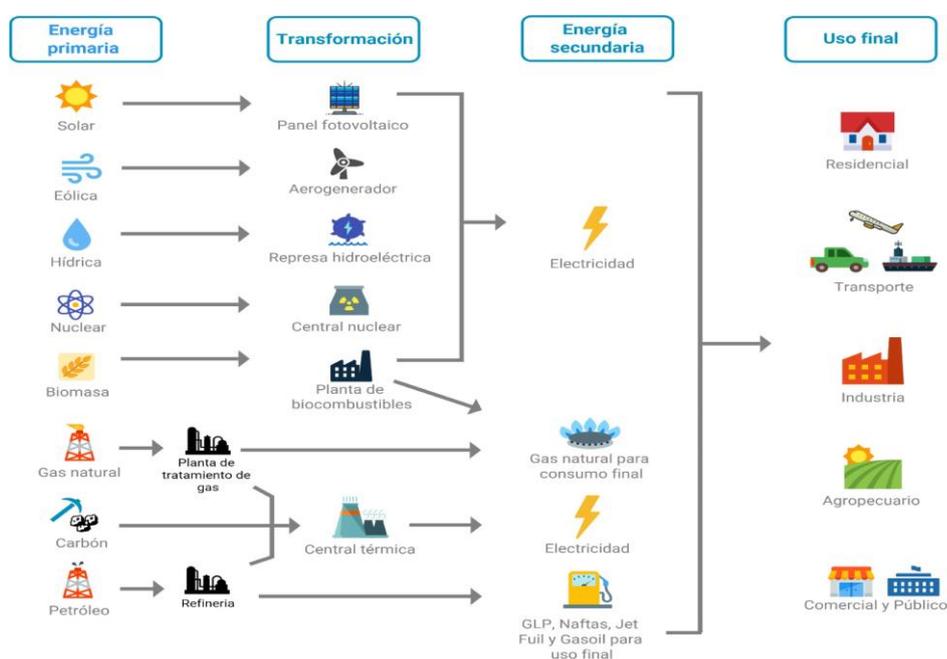


Ilustración 1. Procesos de transformación de la energía primaria hasta la obtención de la denominada "energía de uso final". (Fuente: [1])

La energía juega un papel fundamental en ámbitos esenciales como el medio ambiente y la sostenibilidad, la prosperidad económica, el desarrollo social, y la innovación tecnológica.

En primer lugar, dentro del contexto del medio ambiente y la sostenibilidad, se hace cada vez más hincapié en el uso de fuentes de energía renovables como la solar, eólica, hidráulica, geotérmica y de biomasa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir el impacto ambiental. En cuanto a su uso, estas fuentes de energía renovable utilizan recursos

naturales que se reponen continuamente y son, teóricamente, inagotables, teniendo un impacto ambiental menor que las fuentes de energía tradicionales.

Por otro lado, existe una clara relación entre el consumo energético y la prosperidad económica de los países. La energía es la base de toda actividad económica y, cómo tal, ha adquirido un papel fundamental en la sociedad de hoy en día. Cabe mencionar que, pese a ello, según la Agencia Internacional de la Energía, en 2019 casi mil millones de personas (aproximadamente un 12% de la población mundial) no tenían acceso a ninguna forma de electricidad [3], la fuente de energía secundaria más importante. Este dato lleva a afirmar que la brecha energética entre países es algo que verdaderamente existe y contra lo que hay que luchar.

Partiendo de lo comentado en el párrafo anterior, es evidente que, hasta que los países subdesarrollados no potencien su sistema energético y en concreto, su consumo eléctrico, no alcanzarán el nivel de desarrollo mínimo que les permita empezar a ser considerados como países desarrollados. Esta afirmación se ve apoyada por la Ilustración 2 [3]. En ella se observa como existe una clara relación entre el PIB per cápita de los países, y la energía consumida por sus habitantes. En la gráfica se observa como los países más desarrollados como Alemania, Estados Unidos, Reino Unido, etc, se encuentran en la parte superior derecha de la dispersión, que coincide con un elevado nivel de explotación y uso de los recursos energéticos, lo que viene unido a una gran capacidad económica. La conclusión, por tanto, es clara: cuanto mejor sea el sistema energético de un país, más podrá producir, y más desarrollado estará.

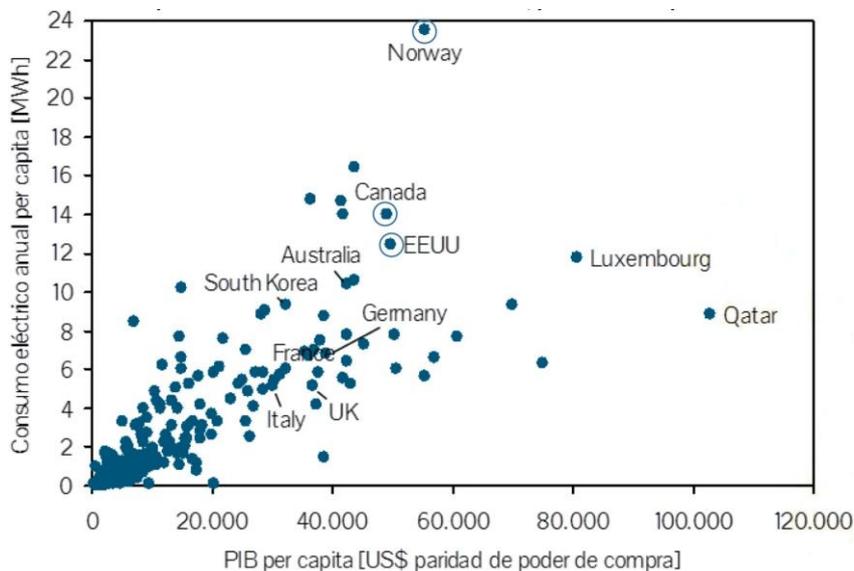


Ilustración 2. Relación entre el consumo energético y el PIB por países (Fuente:[4])

Por último, en el ámbito del desarrollo social e innovación tecnológica, la energía es la base para que las personas puedan acceder a servicios básicos de salud, transporte, productividad, etc; mejorando la calidad de vida de forma considerable. El desarrollo social está directamente relacionado con la prosperidad económica y, por tanto, con lo mencionado anteriormente. Paralelamente, la energía potencia el avance de nuevas tecnologías, y, de hecho, gran parte de las nuevas tecnologías son al 100% dependientes de la energía. Un ejemplo es el caso de los data centers, los cuales son cada vez más necesarios para almacenar todos nuestros datos (que crecen a un ritmo exponencial) en las denominadas “nubes”.

2.2 INTRODUCCIÓN A LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS

En este apartado se describirán las principales tecnologías energéticas disponibles en la actualidad, esto es, el conjunto de técnicas empleadas para la obtención y de la energía. Generalmente se utilizan para producir electricidad, pero se pueden utilizar en menor medida para obtener otras formas de energía, como energía térmica. El criterio de clasificación a emplear diferencia las tecnologías según la naturaleza de la fuente de energía utilizada, es decir, energías renovables y no renovables.

2.2.1 ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables proceden de recursos naturales (como el sol, el viento, el agua o la biomasa) y se caracterizan por su suministro inagotable y sus nulas emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de las fuentes de energías renovables, destacan las siguientes [9]:

I) Energía solar: La energía solar se aprovecha de la radiación del sol. Existen dos formas principales de energía solar:

- Energía solar fotovoltaica: Capta la luz del sol y la convierte en energía eléctrica mediante paneles solares fotovoltaicos.
- Energía solar térmica: Utiliza el calor del sol mediante colectores térmicos que absorben y concentran este calor.

II) Energía eólica: La energía eólica se genera a partir de la fuerza del viento. Los aerogeneradores aprovechan la energía cinética de las masas de aire en movimiento, convirtiéndola en energía eléctrica.

Los parques eólicos pueden clasificarse en dos tipos según su ubicación:

- Energía eólica terrestre (on-shore): cuando las turbinas están situadas en tierra.
- Energía eólica marina (off-shore): cuando las turbinas están situadas en el mar.

III) Energía hidráulica: Comúnmente conocida por energía hidroeléctrica, produce energía eléctrica a partir de la energía mecánica presente en el agua en movimiento. Esta transformación tiene lugar en las centrales hidroeléctricas, que pueden ser de varios tipos:

- Centrales hidroeléctricas de embalse: Plantas de acumulación por bombeo.
- Centrales hidroeléctricas de agua fluuyente: Plantas de caudal continuo.
- Centrales hidroeléctricas reversibles: Permiten bombear agua hacia arriba en momentos de baja demanda.

IV) Energía geotérmica: Consiste en el aprovechamiento del calor que emite el interior de la Tierra. A pesar de estar presente en cualquier punto geográfico, sólo se puede convertir en energía aprovechable en puntos muy específicos del planeta con unas condiciones físicas concretas.

V) Energía de la biomasa: Se denomina biomasa a la materia orgánica de la cual se puede extraer energía (de ahí que también se conozca como bioenergía). Puede ser aprovechada de diversas maneras, por ejemplo, se pueden obtener biocombustibles neutros en carbono.

VI) Energía del mar: También llamada “energía de los océanos”. Destacan los siguientes tipos:

- Energía mareomotriz: Aprovecha la subida y bajada de las mareas.
- Energía undimotriz: Aprovecha el movimiento procedente de las olas.

2.2.2 ENERGÍAS NO RENOVABLES

Las energías no renovables se caracterizan por derivar de fuentes agotables y que no se regeneran en un corto período de tiempo. Son recursos que han tardado miles de años en originarse y para su regeneración tendrían que pasar otros miles de años, por lo que, a escala humana, se considera que se agotan y no se regeneran. Entre los tipos de energías no renovables destacan las siguientes [9]:

I) Energía térmica (combustibles fósiles): Proviene de la materia orgánica que ha quedado atrapada entre las capas de sedimentos de la Tierra durante millones de años. Este grupo está formado principalmente por el petróleo, el carbón y el gas natural y la principal tecnología que convierte estos combustibles en energía eléctrica son las centrales térmicas. Un tipo de central térmica muy utilizado en la actualidad son las centrales de ciclo combinado (se utiliza tanto una turbina de gas como una turbina de vapor para generar electricidad).

II) Energía nuclear: El principal combustible utilizado en las centrales nucleares es el uranio. A pesar de que el uranio es un recurso limitado (pero muy abundante), la tecnología

de fusión nuclear sería capaz de utilizar este combustible de manera muy eficiente, por lo que se podría llegar a considerar el uranio como combustible inagotable en cierta medida. Además, este tipo de tecnología no genera gases de efecto invernadero. El principal problema que presenta esta tecnología son los residuos radiactivos.

2.3 EL CONSUMO ENERGÉTICO MUNDIAL Y SU EVOLUCIÓN HISTÓRICA

No fue hasta la aparición de la Revolución Industrial en la segunda mitad del siglo XVIII cuando el ser humano comenzó a utilizar la energía de forma intensiva en sus sistemas de producción, transformando la economía. Este hito histórico culminó con la invención de máquinas, como la máquina de vapor, que incrementaron notablemente el uso del carbón como fuente de energía primaria. Más tarde, con el auge de la industria petroquímica y el desarrollo del transporte, se introdujeron en el mix energético otras fuentes de energía como el petróleo y el gas (utilizados principalmente en la producción de electricidad y calor). La evolución histórica del consumo de electricidad se muestra en la Ilustración 3.

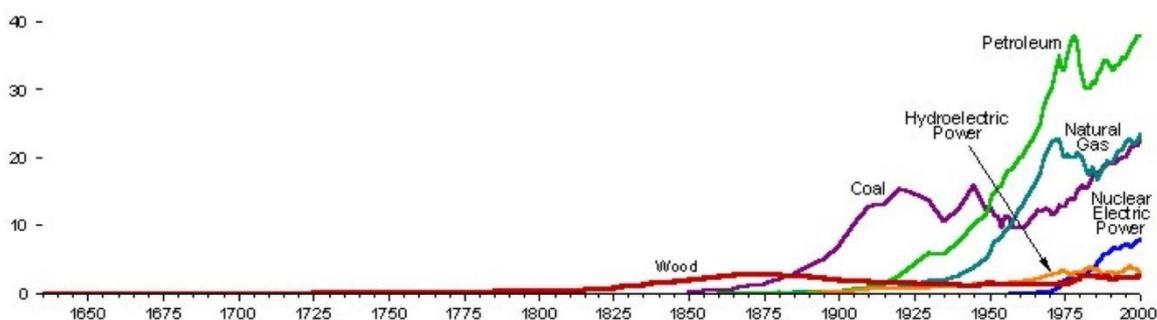


Ilustración 3. Evolución del consumo energético mundial desde su aparición. (Fuente: [6])

El aumento del consumo de energía año tras año se hace evidente en el gráfico anterior. Esto se debe no sólo a los avances tecnológicos (aumento de la producción), sino también al hecho que la población mundial se ha multiplicado por siete desde 1850.

Las tendencias de producción y las ideas generadas durante la Revolución Industrial siguen siendo relevantes hoy en día. Además, “dado que la industrialización se basa en parte en la sustitución de las fuentes de energía animadas por las inanimadas, podría suponerse que las economías son cada vez más intensivas en energía” [6]. Sin embargo, cabe señalar que la industrialización es cada vez más productiva, lo que significa que cuesta menos energía producir cada unidad de producto [6].

En consecuencia, se produce un aumento neto del consumo de energía, impulsado por factores como el aumento de la producción y la riqueza (incluido el transporte de mercancías y todas las formas de producción), el crecimiento de la población y la mejora de la calidad de vida (calefacción, refrigeración, transporte, etc.). Por otro lado, entre los factores que reducen el consumo de energía se encuentran la productividad y la eficiencia de los procesos, teniendo en cuenta las medidas de eficiencia energética y transición adoptadas cada vez más a nivel nacional y supranacional.

2.3.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA DEMANDA ENERGÉTICA A NIVEL MUNDIAL

Como consecuencia de estos factores, la demanda mundial de energía aumenta cada año. En las últimas décadas, se ha producido un aumento anual del consumo mundial de energía que oscila entre el 2% y el 5%, excepto en periodos de recesión económica, en los que el uso de la energía tiende a disminuir. Al examinar el consumo de energía por regiones, se observan las siguientes tendencias [7]:

- En América y Europa, el consumo de energía crece, pero a un ritmo más modesto (en torno al 1%), ya que se trata en su mayoría de regiones desarrolladas.
- En Asia, África y Oceanía, el aumento es mucho mayor (por encima del 5%), debido a que muchos países de estas zonas aún están en vías de desarrollo.

Las fuentes de energía primaria pueden utilizarse para producir formas de energía secundaria, como la electricidad, o pueden utilizarse directamente como combustibles para fines industriales, transporte y sistemas de calefacción. En cuanto al consumo de energía primaria, más de la mitad es utilizada anualmente por China, Estados Unidos y la Unión Europea, las principales potencias económicas [7]. Estas fuentes de energía primaria se

clasifican en renovables y no renovables; estas últimas comprenden principalmente combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas.

En los últimos años se ha producido un claro esfuerzo de los gobiernos por descarbonizar y electrificar el consumo energético mundial, como demuestra el "Pacto Verde de la UE", que fija objetivos como reducir las emisiones en un 55% para 2030. No sólo la UE ha aprobado este tipo de planes; otras potencias como EEUU o China (aunque en menor medida) quieren seguir el mismo camino. Estos objetivos pueden parecer demasiado ambiciosos si se observa la ilustración 4, que muestra que, en la última década, aproximadamente el 33%, el 22% y el 28% del consumo mundial de energía dependían del petróleo, el gas y el carbón, respectivamente, como fuentes de energía primaria. Esto indica que, en la actualidad, cerca del 80% de la energía consumida procede de la quema de combustibles fósiles (altamente contaminantes, a menos que se haga con sistemas como la captura de CO₂).

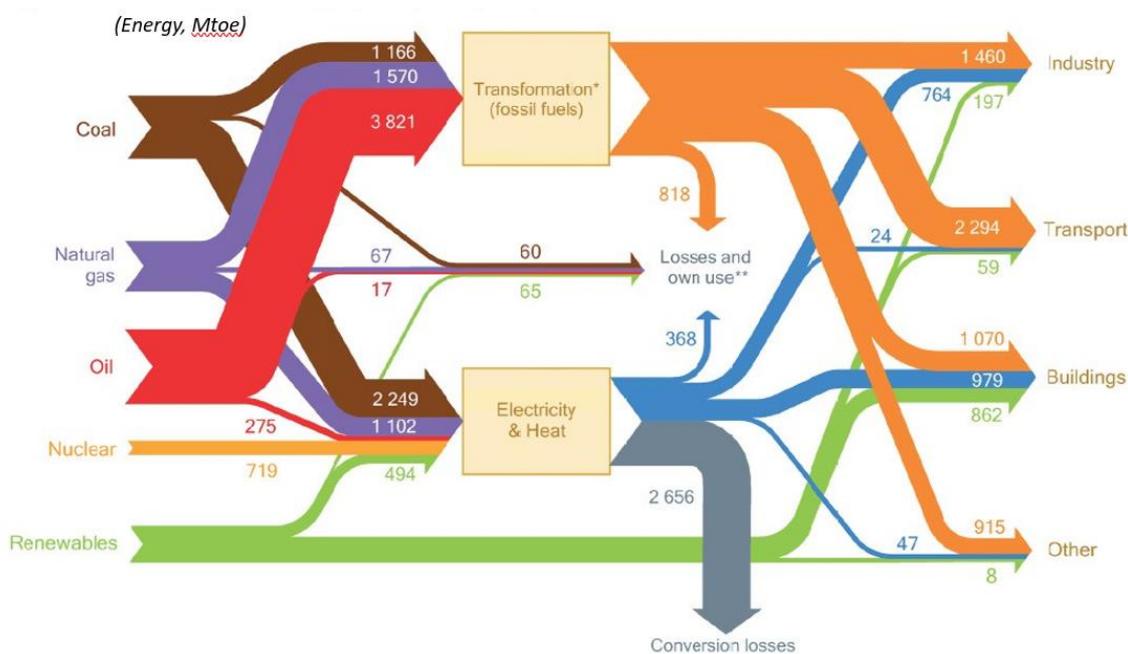


Ilustración 4. Diagrama Sankey de los flujos de energía dividido por las principales industrias. (Fuente [8])

El diagrama Sankey anterior muestra las cantidades de energía, en millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe), provenientes de las principales fuentes existentes, y la transformación que sufren hasta que llegan a los principales sectores donde se consumen. Cabe destacar la cantidad de energía que se pierde (“Losses and own use” y “Conversion losses”) antes de llegar a su uso final. Por ello, es imprescindible seguir desarrollando los conceptos de eficiencia y optimización energética dentro de las principales industrias.

2.3.2 MIX ENERGÉTICO DE LOS PAÍSES MÁS REPRESENTATIVOS

Las ilustraciones 5 y 6 muestran los mix energéticos de los países miembros del G20. Es importante señalar que, colectivamente, representan alrededor del 85% de la producción económica mundial, por lo que ofrecen una muestra representativa del consumo de energía.

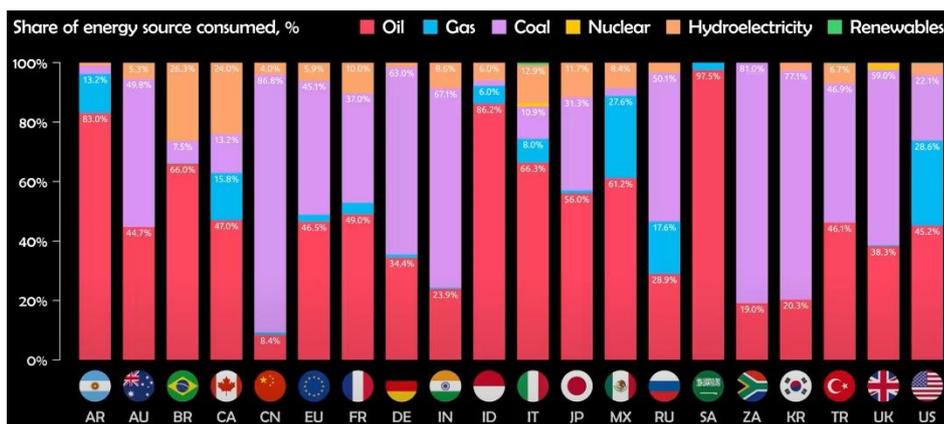


Ilustración 5. Mix energético de los países del G20 en 1965. (Fuente: [11] vía Visual Capitalist)

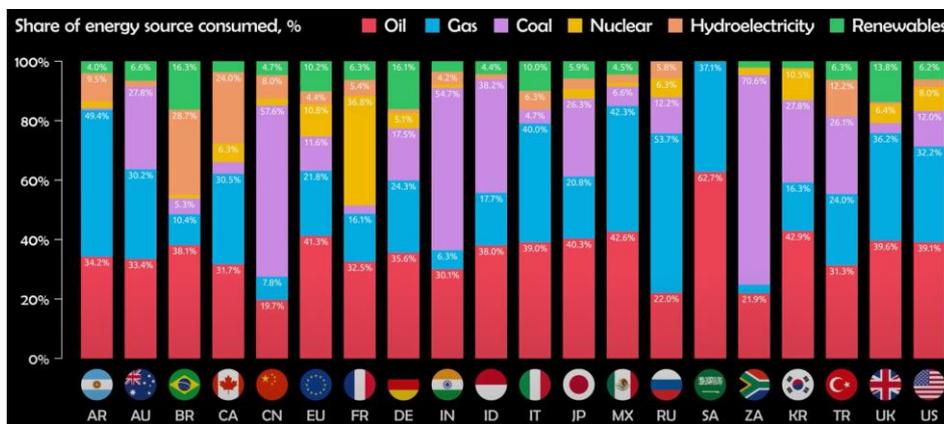


Ilustración 6. Mix energético de los países del G20 en 2020. (Fuente [11] vía Visual Capitalist)

Los histogramas ilustran que, desde 1965 hasta la actualidad, la tendencia ha sido reducir el consumo de petróleo, carbón y tecnología hidroeléctrica y aumentar el uso de gas, energías renovables y energía nuclear.

Además, se observa que las tecnologías renovables y nucleares se han visto cada vez más favorecidas por algunos países, como Francia. Por otra parte, cada vez se depende más del gas tanto para la generación de electricidad como para la climatización de edificios, lo que, dados los limitados lugares de extracción, podría acarrear importantes problemas derivados de conflictos geopolíticos, como la reciente invasión de Ucrania por Rusia.

Capítulo 3. ANÁLISIS COMPARATIVO

El objetivo de este capítulo es realizar un análisis comparativo exhaustivo de las principales tecnologías renovables de producción de energía, evaluando su viabilidad y eficacia desde múltiples perspectivas. Para la realización del análisis se han tenido en cuenta numerosos criterios con el fin de proporcionar una comprensión integral sobre el estado actual y potencial futuro de estas tecnologías energéticas. El capítulo se divide en cuatro bloques: definición del perímetro, metodología, resultados y síntesis de los resultados.

3.1 DEFINICIÓN DEL PERÍMETRO DE ESTUDIO

En primer lugar, es indispensable definir el perímetro del análisis, es decir, identificar las tecnologías a comparar y los criterios con los que se van a comparar.

3.1.1 DETALLE DE LAS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS A ESTUDIAR

En primer lugar, es indispensable definir el perímetro del análisis, es decir, identificar las tecnologías a comparar y los criterios con los que se van a comparar, por ello, las tecnologías de energías renovables objeto del análisis son las siguientes:

I) Energía solar fotovoltaica: Esta tecnología es una fuente de energía renovable y limpia que produce electricidad a partir de la radiación solar. Está basada en el efecto fotoeléctrico, esto es, la capacidad de ciertos materiales de absorber fotones (partículas lumínicas) y liberar electrones, generando una corriente eléctrica. Para ello, se utilizan las células fotovoltaicas (Ilustración 7), un dispositivo semiconductor que puede estar formado de silicio monocristalino, policristalino o amorfo, o bien de otros semiconductores. Las de silicio monocristalino, elaboradas a partir de un único cristal de silicio puro, son las más eficientes. Por otro lado, las de silicio policristalino, elaboradas a partir de varios bloques de cristales, son más económicas que las anteriores y obtienen rendimientos menores. Por último, las de silicio amorfo están formadas por una red cristalina desordenada y son las más económicas y las que peor rendimiento tienen de las tres [12].



Ilustración 7. Imagen de planta solar fotovoltaica. (Fuente: [13])

II) Energía solar térmica: La energía solar térmica, también denominada energía termosolar, aprovecha los rayos del sol para generar calor. Para convertir la radiación solar y transformarla en calor, se utilizan dispositivos como las placas solares o el termosifón. La energía producida se puede aprovechar de diversas maneras, (generación de energía mecánica, energía eléctrica, climatización de edificios, etc.). Además, casi todas las plantas de este tipo presentan un depósito acumulador, donde se almacena el calor producido, lo que permite aprovechar el suministro de energía aún cuando no hay luz solar disponible [14].

El funcionamiento de las centrales termosolares se puede resumir en la siguiente estructura [14]:

1. Captación: Se concentra la radiación solar en un punto focal mediante el uso de espejos o heliostatos.
2. Transferencia de calor: El calor concentrado es transferido a un fluido (generalmente agua, aceite o sales fundidas) que se calienta hasta temperaturas muy elevadas y circula por los receptores solares.

3. Almacenamiento: El calor que circula por los receptores solares finalmente se almacena en tanques térmicos, que actúan como baterías. Dichos tanques permiten el suministro de energía incluso cuando no hay luz solar.
4. Generación de electricidad: Se utiliza el calor generado para producir vapor, el cual mueve una turbina que genera electricidad.

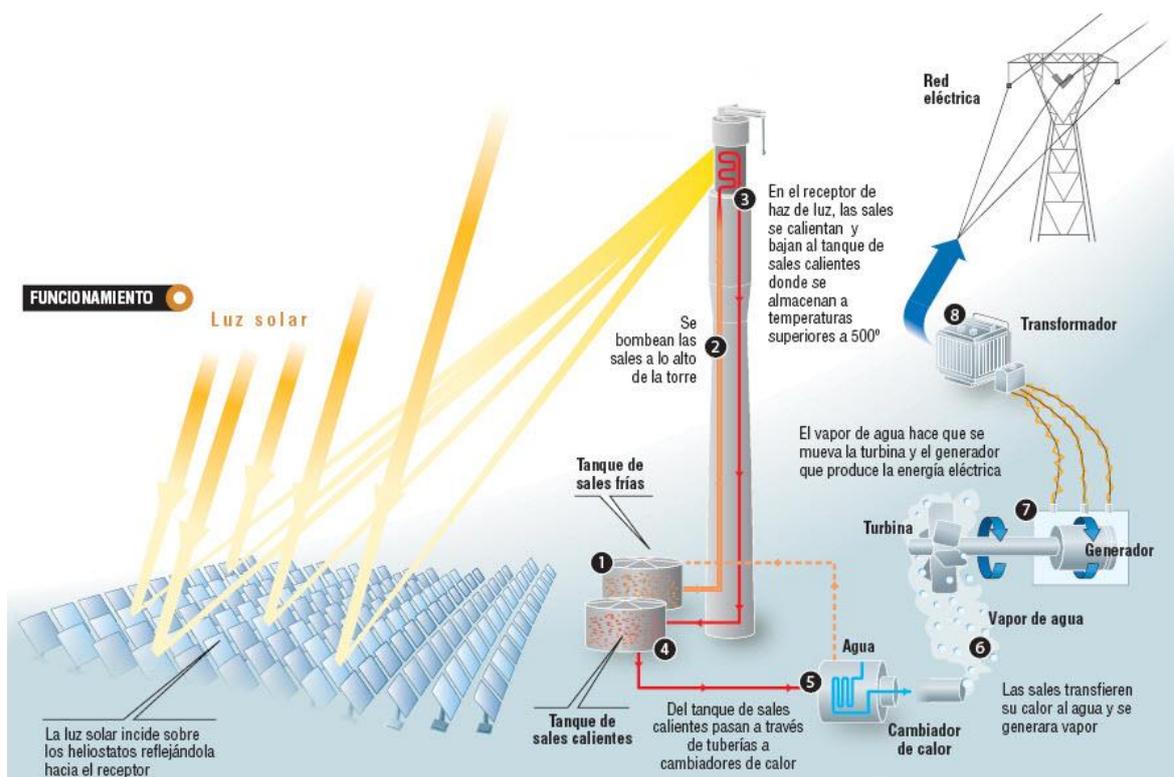


Ilustración 8. Funcionamiento de una planta de energía solar térmica. (Fuente [15])

III) Energía eólica (terrestre y marina): La energía aprovecha la fuerza del viento para producir energía eléctrica. Esto es posible mediante el uso de aerogeneradores, que pueden alcanzar hasta los 120 metros de altura. La ubicación de los mismos es un factor clave, ya que tienen que estar ubicados en lugares donde la presencia del viento sea predominante para que el parque tenga un rendimiento considerable. Además, es fundamental que se orienten en dirección al viento [16].

Las partes fundamentales de un aerogenerador son las siguientes [16]:

- Rotor: Se encarga de captar la fuerza del viento y la transforma en energía mecánica de rotación. Está formado por tres palas y un buje que las une.
- Multiplicadora: Su función es, como su propio nombre indica, multiplicar la lenta velocidad de giro de las palas (entre 18 y 30 rpm) en una rotación más rápida (puede llegar hasta las 1,800 rpm) que hace funcionar el generador eléctrico.
- Generador: Transforma la energía de mecánica de rotación en energía eléctrica. Todos los aerogeneradores están conectados mediante cables subterráneos que llevan la energía eléctrica a una subestación transformadora. Desde ahí se transporta al lugar final (hogares, fábricas, etc.) mediante las redes de distribución de las compañías eléctricas.

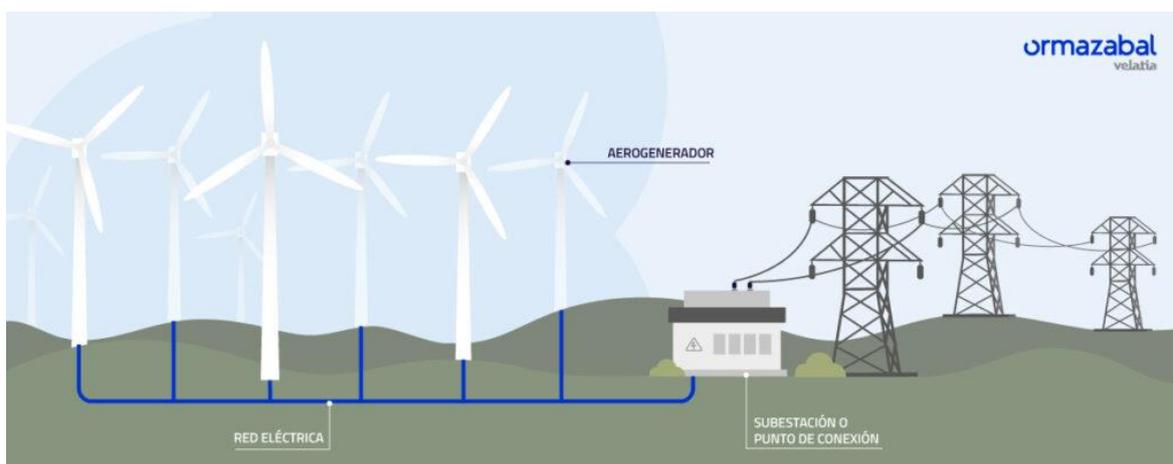


Ilustración 9. Partes de un parque fotovoltaico terrestre. (Fuente [17])

Por último, dependiendo de la ubicación del parque eólico, se pueden encontrar dos tipos:

- Parque eólico terrestre: Se muestra en la Ilustración 9, es aquel que se encuentra emplazado en tierra.
- Parque eólico marino: Aprovecha la energía del viento que se produce en alta mar, donde suele tener una velocidad mayor y es más constante debido a la inexistencia de barreras físicas. Para ello, se construyen complejas estructuras asentadas sobre el lecho marino.

IV) Energía hidroeléctrica: Aprovecha el movimiento del agua para producir electricidad, es decir, a partir de la energía cinética y potencial de las corrientes o saltos de agua.

El funcionamiento de una central hidroeléctrica se basa en hacer girar una turbina mediante el impulso de una corriente o salto de agua. Generalmente están ubicadas en la base de una empresa, ya que permite controlar el flujo de agua que hace girar a la turbina, siendo la manera más eficiente de producir energía eléctrica. El funcionamiento es el siguiente [18]:

1. Acumulación de agua: Se acumula una gran cantidad de agua dentro del embalse, por lo que la energía del agua se encuentra en forma de energía potencial en este momento.
2. Apertura de la esclusa: La energía potencial se transforma en energía cinética en el momento en el que se deja correr el agua por acción de la gravedad.
3. Movimiento de la turbina: Esa energía cinética se transfiere a la turbina en forma de energía cinética rotacional.
4. Acción del generador: El generador aprovecha el movimiento de la turbina para transformar esa energía cinética rotacional en energía eléctrica por acción de un campo magnético.
5. Cambio de voltaje en el transformador: Aumenta el voltaje de la energía eléctrica producida por el generador (generalmente corriente alterna).
6. Conexión a la red eléctrica: Una vez se consigue la energía eléctrica con un voltaje adecuado, esta se conecta a la red eléctrica para ser distribuida hasta los consumidores finales.

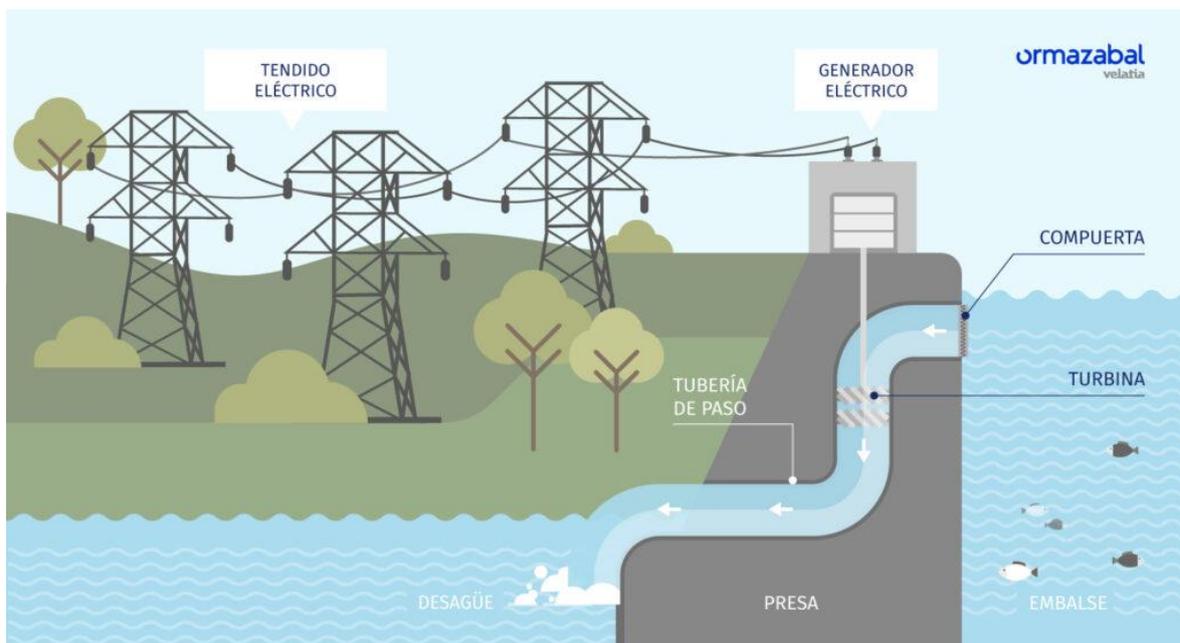


Ilustración 10. Partes de una central hidroeléctrica. (Fuente:[19])

V) Energía geotérmica: La energía geotérmica se define como “la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie de la Tierra” (EGEC). Este calor puede estar almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, a cualquier temperatura o profundidad. La energía geotérmica se clasifica de diversas maneras dependiendo del recurso natural utilizado (agua caliente, pozos secos, géiseres, vapor seco), la profundidad de perforación (superficial o subterráneo, que puede llegar hasta profundidades de más de 10km) o la temperatura del agua, entre otros [20].

El funcionamiento de una central geotérmica es el siguiente (la numeración hace referencia a la Ilustración 11 [20]):

1. Extracción de una mezcla de vapor y agua mediante un pozo subterráneo.
2. El separador ciclónico se encarga de separa el vapor de las moléculas de agua.
3. El agua en estado líquido vuelve al subsuelo para que se vuelva a calentar.
4. El vapor extraído en el separador hace girar una turbina (energía cinética) que activa un generador de energía eléctrica.

5. El generador transforma la energía cinética en energía eléctrica.
6. Un transformador aumenta el voltaje de la energía eléctrica, para, posteriormente, trasladarla a la red de distribución para que llegue al consumidor final.
7. El vapor que sobra se condensa y se vuelve a introducir al subsuelo para que el proceso se repita de nuevo.

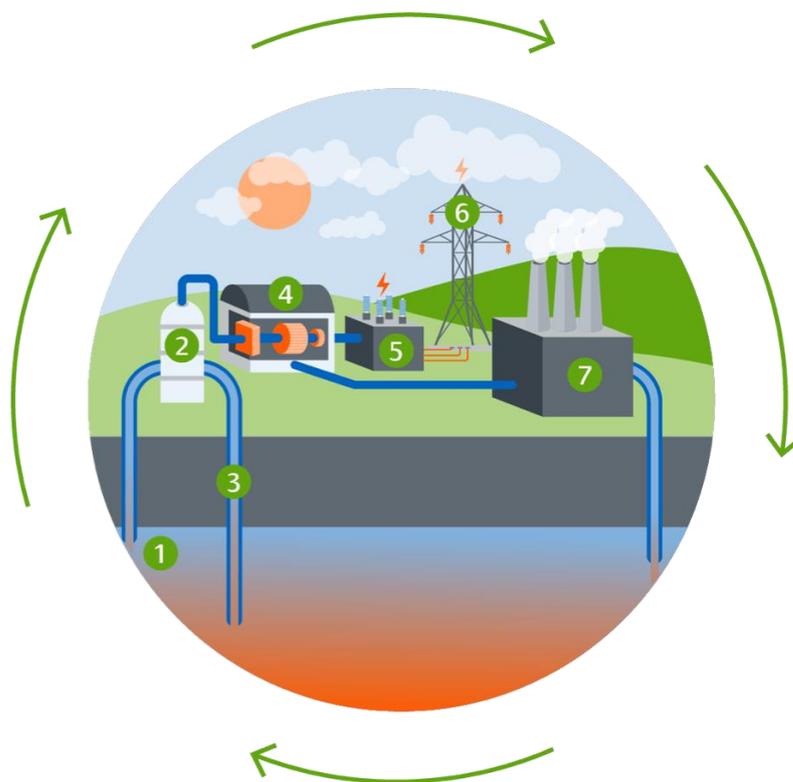


Ilustración 11. Ciclo de funcionamiento de una central geotérmica. (Fuente: [20])

VI) Biomasa: Se define como toda materia orgánica que pueda ser utilizada como fuente de energía. Puede ser tanto vegetal como animal, y puede ser obtenido tanto de forma natural como artificial mediante transformaciones que se realizan en las centrales de biomasa. Al aplicarle ciertos procesos químicos, se consigue transformar esta materia orgánica en energía.

Existen tres grupos principales de biomasa [21].

- Biomasa natural: Se obtiene directamente de la naturaleza, sin ningún tipo de intervención humana.
- Biomasa residual: Residuos orgánicos provenientes de las actividades humanas (como los residuos sólidos urbanos).
- Biomasa producida: Existen cultivos energéticos donde se produce materia orgánica la finalidad de transformarla en energía.

Actualmente, existen diversos métodos para transformar la biomasa en energía aprovechable, entre los que destacan los métodos termoquímicos (combustión, pirólisis, gasificación y co-combustión) y los métodos bioquímicos (fermentación alcohólica y fermentación metánica). Utilizando las diferentes tecnologías mencionadas se puede transformar la biomasa para producir energía eléctrica, energía térmica, producción de biogás y producción de biocombustibles que replacen los provenientes de combustibles fósiles [21].

Para este proyecto, nos centraremos en la producción de energía eléctrica, por lo que es relevante entender el funcionamiento de una central de biomasa (muy similar al de las centrales térmicas convencionales) [21]:

1. Existe un edificio de preparación del combustible, que se encarga de clasificar el combustible principal de la instalación en función de su tamaño. Posteriormente se almacena.
2. El combustible se conduce a la caldera para su combustión.
3. El agua de las tuberías de la caldera se convierte en vapor debido al intercambio de calor con los gases de combustión.
4. El vapor generado en la caldera hace girar una turbina. Dicha energía cinética es aprovechada por el generador para la producción de energía eléctrica.
5. El vapor de agua se condensa y se reutiliza para realizar el ciclo de nuevo.

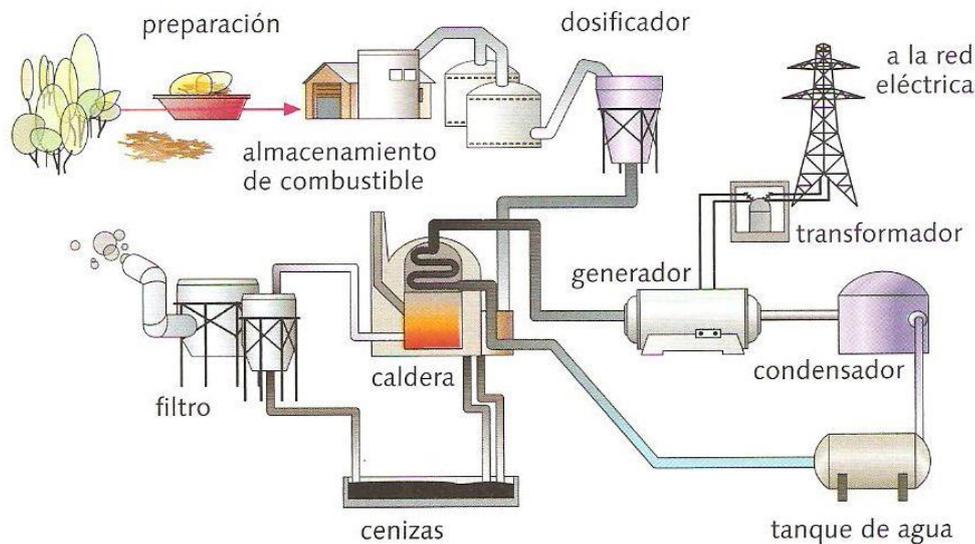


Ilustración 12. Esquema de una central de biomasa. (Fuente: [22]).

VII) Energía mareomotriz: Es un tipo de energía renovable que aprovecha la anergía potencial y cinética presente en el movimiento de las mareas (producido por la atracción gravitatoria ejercida por el Sol y la Luna sobre nuestro planeta) para transformarlo en energía cinética.

Existen tres tipos de centrales para generar este tipo de energía: Generador de corriente de marea, presa de marea y energía mareomotriz dinámica. Para la realización del análisis comparativo, nos centraremos en las centrales de generador de corriente de marea, cuyo funcionamiento es el siguiente [23]:

1. La corriente de agua hace girar las llamadas turbinas mareomotrices, de tal forma que aprovecha la energía cinética del agua para transformarla en energía cinética rotacional presente en las turbinas.
2. La energía de las turbinas es aprovechada por un generador, que la transforma en energía eléctrica.
3. La energía eléctrica producida por el generador pasa por un transformador que aumenta el voltaje de la misma y, posteriormente, se distribuye por la red eléctrica hasta el consumidor final.

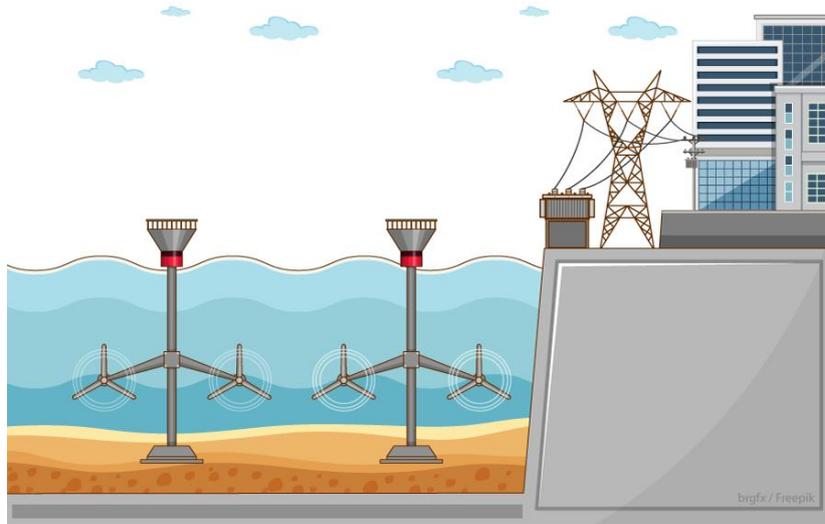


Ilustración 13. Generador de corriente de marea. (Fuente: [24])

VIII) Energía undimotriz: Es la energía mecánica proveniente del movimiento de las olas marinas. Es una de las energías renovables que mayor potencial presenta, aunque todavía no está del todo desarrollada [25].

Actualmente destacan los siguientes tipos de centrales undimotrices capaces de generar energía eléctrica [26]:

- **Columna de agua oscilante:** Mecanismo que aprovecha el movimiento de las olas para presionar el aire de unas cámaras, que sube hacia arriba pasando por unas turbinas haciéndolas girar. A su vez, cuando la ola se retira, el aire es succionado y también hace girar la turbina, generando energía eléctrica a partir del generador.
- **Boya de punto de absorción:** Consiste en un sistema de boyas ancladas al fondo marino mediante un poste que contiene un sistema hidráulico que comprime el agua contenida en la estructura, activando el generador que produce la energía eléctrica.
- **Columpio de las olas de Arquímedes:** Está formado por una estructura fija y otra móvil. Mientras que la fija está anclada al fondo marino, la móvil está llena de aire que se mueve verticalmente, siguiendo el oleaje. Dicho movimiento entre la parte móvil y la fija hace que el aire del flotador se comprima, equilibrándose así las

presiones. A partir de un sistema hidráulico y un motor, esta energía mecánica se transforma en electricidad.

3.1.2 DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS COMPARATIVOS

La segunda parte de la definición del perímetro consiste en identificar los criterios que se utilizarán para realizar el análisis, describiendo brevemente los diferentes parámetros y variables que se tratarán en cada uno de ellos. Los criterios son los siguientes:

- 1. Eficiencia:** Este apartado tratará de comparar dos variables principalmente:
 - Rendimiento energético: Variable que expresa la cantidad de energía producida en relación con la energía invertida.
 - Consistencia de producción: Mide la fiabilidad y previsibilidad de la generación de energía.
- 2. Criterio económico:** Este apartado girará en torno a tres variables principalmente:
 - Costes de inversión: Relacionado con el capital necesario para poner en funcionamiento la planta energética (costes de adquisición, gastos de instalación o costes de planificación y permiso, entre otros).
 - LCOE: Proviene del inglés “Levelized Cost Of Energy”, cuya traducción al castellano es “coste nivelado de la energía”. Esta variable determina el coste por kilovatio hora al que se debería vender la electricidad para conseguir el cubrir los gastos totales del proyecto de energía (generalmente calculado en un período de 20 a 40 años). Por lo tanto, es un parámetro que nos permite medir la rentabilidad de una planta, por lo que, a priori, a menos LCOE, mayor rentabilidad nos dará planta (en términos generales y considerando un precio de la energía común a todas las tecnologías).
- 3. Riesgos:** Este punto considera los principales riesgos de cada tecnología, entre los que destacan: riesgos tecnológicos, riesgos financieros y riesgos regulatorios (directamente relacionados con los riesgos medio ambientales).
- 4. Sostenibilidad:** Se medirá a partir de las siguientes variables:
 - Impacto ambiental: Incluye aspectos como la huella de carbono o el impacto sobre la biodiversidad.

- Gestión de recursos y de residuos: Analiza la gestión de recursos utilizados para la producción de energía, así como los residuos generados.

5. Potencial de crecimiento: Este apartado gira en torno a dos variables principalmente:

- Factor de capacidad actual: Esta variable determina cada cuanto una planta está trabajando al máximo de capacidad. Es decir, si el valor del factor de capacidad es del 100%, eso quiere decir que la planta está generando la máxima cantidad de energía que puede generar y, por lo tanto, está trabajando de forma continua.
- Capacidad de expansión: Mide la capacidad de expansión de cada tecnología para determinar si podrá lidiar con la demanda energética futura (no de manera individual, sino teniendo en cuenta que habrá un mix energético combinación de más fuentes de energía).
- Adaptabilidad geográfica: Útil para determinar las geografías en las que se podrían instalar las tecnologías, ya que muchas de ellas necesitan condiciones tan específicas, que no se podrían desarrollar en la mayoría de los territorios del planeta.

3.2 METODOLOGÍA

En este bloque de metodología, se busca explicar de forma detallada cómo se va a realizar el análisis y cómo se van a presentar los resultados:

1. **Proceso de análisis:** Para el análisis comparativo de las tecnologías, se utilizará un enfoque mixto, combinando tanto análisis cuantitativo como análisis cualitativo. Se tratarán de medir las variables descritas en el apartado anterior para cada tecnología.
2. **Presentación de resultados:** Los resultados se podrán presentar de diversas maneras, pudiendo utilizar gráficos, tablas y análisis descriptivos; de tal forma que se tendrá una visión holística de todas las tecnologías para cada criterio comparativo.

- 3. Síntesis de resultados:** El propósito de esta sección es integrar todos los resultados del análisis en una tabla comparativa, lo que permitirá identificar las tecnologías más óptimas de manera integral, proporcionando una visión global del ejercicio.

3.3 RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, en esta parte del capítulo se mostrarán los resultados del análisis comparativo, para finalmente juntarlos en una misma tabla a modo de síntesis, en el próximo apartado.

3.3.1 EFICIENCIA

Las dos variables que se van a estudiar en este apartado son el rendimiento y la consistencia de producción, como se ha mencionado anteriormente.

a. Rendimiento

La siguiente tabla (Ilustración 14), muestra el rendimiento aproximado para las diferentes tecnologías de producción de energías renovables [27]:

<u>Tecnología</u>	<u>Rendimiento aproximado (%)</u>
Solar fotovoltaica	20
Solar térmica	85
Eólica (terrestre)	45
Eólica (marina)	45
Hidroeléctrica	90
Geotérmica	30
Biomasa	-
Mareomotriz	-
Undimotriz	-

Ilustración 14. Tabla comparativa del rendimiento de las principales tecnologías de energías renovables.

(Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar que la energía que presenta un mayor rendimiento es la hidroeléctrica, con un 90%. Posteriormente le sigue de cerca la solar térmica con un 85% y más abajo se

encuentra la eólica, tanto terrestre como marina, con un 45%. Es destacable que la planta solar térmica tiene un rendimiento extremadamente superior al de la planta solar fotovoltaica (85% frente a 20%).

Por último, cabe mencionar que entre las diferentes tecnologías hay que tener en cuenta que cada una tiene un rendimiento máximo teórico diferente, por lo que se debe tener cuidado a la hora de comparar los rendimientos absolutos, y se debería tener en cuenta este rendimiento máximo teórico si se quiere observar, en cierta medida, cómo de avanzada está cada una de ellas.

b. Consistencia de producción

Se entiende por consistencia de producción la capacidad de cada una de las diferentes tecnologías de producir energía de forma constante y previsible a lo largo del tiempo. Por ende, este factor cambia de forma drástica en función del tipo de geografía en la que nos encontremos. La siguiente tabla muestra de forma cualitativa el grado de consistencia de las diferentes tecnologías:

Tecnología	Consistencia
Solar fotovoltaica	Baja
Solar térmica	Media
Eólica (terrestre)	Media
Eólica (marina)	Media
Hidroeléctrica	Alta
Geotérmica	Alta
Biomasa	Alta
Mareomotriz	Alta
Undimotriz	Baja

Ilustración 15. Comparación de la consistencia de las diferentes tecnologías. (Fuente: Elaboración propia)

De la tabla se puede extraer que las tecnologías más consistentes son la hidroeléctrica, geotérmica, biomasa y mareomotriz, debido a su alta previsibilidad de producción. En cambio, la energía undimotriz y la solar fotovoltaica son las más intermitentes y las que más dependen de factores externos.

Cabe destacar que, aunque la solar fotovoltaica y la solar térmica utilicen la misma fuente energética (el sol), tengan grados de consistencia diferentes. Esto se debe a la capacidad de la solar térmica de almacenar energía, como se ha detallado en el apartado 3.1.1 (Detalle de las tecnologías energéticas a estudiar), lo que permite a esta tecnología seguir aprovechando la energía aun cuando no hay luz solar disponible, ya sea por las condiciones meteorológicas o porque sea de noche. Por último, se considera que la energía eólica presenta más consistencia que la solar debido a que, en general, resulta más sencillo la previsión de los vientos que de la nubosidad (afectando a la luz solar), y, además, la energía eólica puede seguir produciendo electricidad de noche mientras que la solar no.

3.3.2 CRITERIO ECONÓMICO

En este apartado se tratarán de cuantificar las variables mencionadas anteriormente (costes de instalación y rentabilidad), para ello, se muestra la siguiente tabla con los resultados [27]:

Tecnología	Coste de inversión (USD / kW)	LCOE (USD / kWh)
Solar fotovoltaica	876	0.049
Solar térmica	4,274	0.118
Eólica (terrestre)	1,274	0.033
Eólica (marina)	3,461	0.081
Hidroeléctrica	2,881	0.061
Geotérmica	3,478	0.056
Biomasa	2,162	0.061
Mareomotriz	-	-
Undimotriz	-	-

Ilustración 16. Tabla comparativa de costes de inversión y LCOEs de las principales tecnologías. (Fuente: Elaboración propia).

La Ilustración 14 muestra una tabla que recoge los valores de las principales variables comparativas en cuanto al aspecto económico. Los valores de la tabla (que provienen de un informe de la IRENA, 2022, [27]) indican que la energía más rentable es la energía eólica, que presenta un LCOE de 0.033 USD/kWh. Le siguen la energía solar fotovoltaica (LCOE = 0.049 USD/kWh) y la geotérmica (LCOE = 0.056 USD/kWh). Por otro lado, en cuanto a

coste de inversión, la más económica es la solar fotovoltaica (876 USD/kW), seguida de la eólica terrestre (1,274 USD/kW) y la de biomasa (2,162 USD/kW).

En cuanto a las tecnologías menos rentables, le peor en términos de LCOE es la solar térmica, con (0.118 USD/kW), y también la más cara en cuanto a costes de inversión (4,274 USD/kW).

De la tabla se puede concluir que las mejores tecnologías teniendo solamente en cuenta aspectos económicos, son la energía solar fotovoltaica y la energía eólica terrestre. Cabe mencionar que este resultado es obtenido a partir de datos de 2022, conforme vayan evolucionando las diferentes tecnologías, este resultado es probable que cambie.

3.3.3 RIESGOS

En este punto se tratará de determinar los riesgos que presentan cada una de las tecnologías. Para ello, lo primero es identificar los principales riesgos a los que se ven sometidas este tipo de tecnologías, para, posteriormente, poder clasificar, de forma cualitativa, el grado de riesgo presente en cada una de ellas.

Los principales riesgos que se van a considerar en este análisis son los siguientes:

1. **Riesgos técnicos:** Se refieren a la posibilidad de fallo dentro en la tecnología utilizada.
2. **Riesgos ambientales:** Están directamente relacionados con el impacto que puede tener el medioambiente en la producción de energía por parte de una tecnología. Se consideran principalmente dos variables: la variabilidad del recurso y los desastres naturales.
3. **Riesgos financieros:** Incluyen principalmente la volatilidad de los precios de la energía y la cuantía de los costes inesperados provenientes un fallo técnico o algo similar (es decir, cuánto influiría económicamente un fallo en algún punto de la planta de producción).
4. **Riesgos regulatorios:** Introducción de nuevas leyes o cambios en la legislación vigente que podría afectar al potencial desarrollo de la tecnología.

En la siguiente tabla se muestra una clasificación cualitativa de cada uno de los riesgos mencionados:

Tecnología	Riesgos			
	Técnicos	Ambientales	Financieros	Regulatorios
Solar fotovoltaica	Medio	Alto	Bajo	Medio
Solar térmica	Medio	Medio	Alto	Medio
Eólica (terrestre)	Medio	Medio	Bajo	Medio
Eólica (marina)	Medio	Medio	Alto	Alto
Hidroeléctrica	Alto	Bajo	Medio	Alto
Geotérmica	Alto	Bajo	Alto	Medio
Biomasa	Alto	Bajo	Alto	Medio
Mareomotriz	Alto	Bajo	Alto	Medio
Undimotriz	Alto	Alto	Alto	Medio

Ilustración 17. Tabla ilustrativa de los principales riesgos que afectan a las tecnologías. (Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar de la table que la tecnología que presenta menos riesgos es la eólica terrestre, destacando por sus bajos riesgos financieros, que se deben en parte al coste de inversión y rentabilidad que presenta la tecnología (detallado en el apartado anterior). Por otra parte, la tecnología que presenta riesgos más elevados es la undimotriz, debido, en parte, a ser una tecnología emergente, lo que provoca que los riesgos técnicos y financieros sean elevados. Además, los riesgos técnicos y financieros de las 4 últimas tecnologías de la tabla presentan riesgos elevados ya que, como en el caso de la energía undimotriz, no han alcanzado un grado de desarrollo elevado y todavía no son muy utilizadas.

3.3.4 SOSTENIBILIDAD

Este punto trata de explicar el grado de sostenibilidad de las tecnologías renovables. Para ello, como se ha comentado en el apartado del perímetro, se han considerado las variables de impacto ambiental y gestión de recursos y de residuos. La primera busca principalmente medir el grado de impacto que tienen estas infraestructuras sobre los diferentes ecosistemas, mientras que la segunda está más enfocada al grado de impacto que supone el proceso de

obtención de los recursos utilizados para producir electricidad, así como de la gestión de residuos, ya que ambas pueden ser perjudiciales para el medio ambiente.

Para ello se ha elaborado la siguiente table que recoge los resultados de forma cualitativa:

Tecnología	Impacto ambiental	Gestión de recursos y residuos	Sostenibilidad general
Solar fotovoltaica	Bajo	Medio-Alto	Media-Alta
Solar térmica	Bajo	Medio-Alto	Media-Alta
Eólica (terrestre)	Bajo	Medio	Alta
Eólica (marina)	Bajo	Medio	Alta
Hidroeléctrica	Medio-Alto	Alto	Media
Geotérmica	Bajo	Medio	Alta
Biomasa	Medio	Medio-Alto	Media-Alta
Mareomotriz	Bajo	Medio	Alta
Undimotriz	Bajo	Medio	Alta

Ilustración 18. Tabla de grado de sostenibilidad de las tecnologías. (Fuente: Elaboración propia)

A pesar de que todas sean consideradas energías renovables, no quiere decir que todas ellas sean perfectas en cuanto a sostenibilidad. De la Ilustración 18 se observa que la tecnología hidroeléctrica presenta un grado de sostenibilidad medio, esto es debido al impacto ambiental que causa a los ecosistemas, sobre todo marinos, donde se instalan; así como de la gestión de residuos que hay que realizar a largo plazo con toda la infraestructura implementada. Destacan también la gestión de residuos de las energías “solares”, y esto es debido a los residuos derivados de los paneles solares, que a día de hoy no se pueden considerar sostenibles ya que hay dificultades con su reciclaje. Por último, en el caso de la biomasa, tiene un grado de sostenibilidad medio-alto ya que tiene cierto impacto ambiental (emisiones de CO₂, aunque ciclo de carbono con emisiones neutras), y una gestión de recursos con impacto medio-alto ya que depende de donde se saquen los materiales biológicos, pueden haber supuesto talas de bosques u otro tipo de actividades perjudiciales para el medio ambiente.

En general, la mayoría de las tecnologías presentan un grado de sostenibilidad general bastante alto, lo cual tiene sentido si se parte de la base de que son energías renovables.

3.3.5 POTENCIAL DE CRECIMIENTO

A continuación, se determinará el potencial de crecimiento que tienen las diferentes tecnologías a partir de las variables mencionadas en el apartado de definición de los criterios comparativos. Las variables son: el factor de capacidad actual, la capacidad de expansión y la adaptabilidad geográfica. Para presentar los resultados se ha realizado la siguiente tabla a modo de resumen:

Tecnología	Factor de capacidad	Capacidad de expansión	Adaptabilidad geográfica
Solar Fotovoltaica	17%	Alta	Alta
Solar Térmica	36%	Media	Media
Eólica (Terrestre)	37%	Alta	Alta
Eólica (Marina)	42%	Alta	Media
Hidroeléctrica	46%	Media	Baja
Geotérmica	85%	Media	Baja
Biomasa	72%	Media	Alta
Mareomotriz	-	Alta	Alta
Undimotriz	-	Alta	Alta

Ilustración 19. Tabla comparativa de potencial de expansión de las tecnologías. (Fuente: Elaboración propia)

La tabla proporciona una visión actual de cómo de explotada está cada tecnología, además de la capacidad de expansión en cuanto a potenciales MW a producir; y la adaptabilidad geográfica que presenta. Así, el lector se puede hacer una idea cualitativa del estado actual y potencial futuro de cada una de las energías renovables según las tecnologías analizadas.

Se observa que la solar fotovoltaica es la que más potencial de crecimiento tiene, ya que el factor de capacidad actual es relativamente bajo, la capacidad de expansión es elevada debido a su alta escalabilidad; y si adaptabilidad geográfica es alta ya que se pueden instalar placas solares en una gran cantidad de territorios. En segundo lugar quedaría posicionada la eólica terrestre debido a motivos similares a los de la solar fotovoltaica. Cabe destacar el bajo potencial de crecimiento de la geotérmica, debido a su alta capacidad actual y a su baja adaptabilidad geográfica, ya que (al igual que con la hidroeléctrica), las zonas donde se puede desarrollar una planta geotérmica tienen que cumplir unas condiciones muy específicas, y no son abundantes.

3.4 SÍNTESIS DE RESULTADOS

Este es el último apartado del capítulo y su objetivo es el de resumir los resultados presentados anteriormente. Para ello, se ha realizado una tabla-resumen que recoge la información más importante del apartado de resultados, de tal forma que se puedan comparar todas las tecnologías de manera holística. Para la realización de la tabla, con el objetivo de que no sea extremadamente extensa, se han sintetizado las variables de los apartados en una (por ejemplo, en la parte de eficiencia, se ha realizado una ponderación cualitativa de las variables de rendimiento y consistencia para juntarlas en una global llamada “eficiencia”), a excepción de los criterios económicos. La tabla-resumen es la siguiente:

Tecnología	Eficiencia	Criterios económicos		Riesgos	Sostenibilidad	Potencial de crecimiento
		Coste de inversión (USD / kW)	LCOE (USD / kWh)			
Solar Fotovoltaica	●○○	876	0.049	●●○○	●●○○	●●●●
Solar Térmica	●●●	4,274	0.118	●●●○	●●○○	●●●○
Eólica (Terrestre)	●●○○	1,274	0.033	●○○○	●●●●	●●●●
Eólica (Marina)	●●○○	3,461	0.081	●●●●	●●●●	●●●○
Hidroeléctrica	●●●●	2,881	0.061	●●●○	●○○○	●●○○
Geotérmica	●●○○	3,478	0.056	●●●○	●●●●	●○○○
Biomasa	○○○○	2,162	0.061	●●●○	○○○○	○○○○
Mareomotriz	○○○○	-	-	●●●○	○○○○	○○○○
Undimotriz	●○○○	-	-	●●●●	●●●●	●●●●

Ilustración 20. Tabla resumen del análisis comparativo de las tecnologías. (Fuente: Elaboración propia)

Como se ha comentado antes, la Ilustración 20 muestra de forma resumida los resultados del análisis, tanto de forma cuantitativa (criterios económicos), como de forma cualitativa. Dado que se han explicado previamente los resultados de cada criterio de forma más detallada, no es necesario repetir la información. No obstante, cabe mencionar que la tecnología que ha salido más favorable de este análisis es la eólica terrestre, ya que, aunque no sea la más eficiente, ni la que presenta menor coste de inversión, en el resto de los criterios ha obtenido

la calificación máxima. Por otro lado, la hidroeléctrica no sale favorecida de este análisis debido a sus riesgos (medio – alto), su baja sostenibilidad y su potencial de crecimiento (medio). Por otra parte, a pesar de que sea una de las tecnologías que salen más desfavorables de este análisis, es una de las tecnologías renovables más maduras y que más energía produce a nivel global en la actualidad.

En resumen, cada tecnología tiene sus ventajas y sus desventajas, y no se debe descartar por completo ninguna de ellas. Aun así, a la hora de desarrollar una planta energética renovable, conviene pararse y medir cada uno de estos criterios (y una infinidad de criterios más) para establecer qué tipo de energía es más conveniente para cada caso.

Capítulo 4. MIX ÓPTIMO PARA ESPAÑA

Este capítulo tiene como objetivo exponer el caso de España, aclarando su mix energético actual y definiendo un potencial mix energético óptimo en base a ciertos criterios que se detallarán a continuación. Para ello, se explicará el contexto energético español en primer lugar, para luego dar paso a definir el mix óptimo.

4.1 CONTEXTO ENERGÉTICO EN ESPAÑA

Para comenzar, es relevante definir el perímetro que determina los sectores donde se va la energía producida. A continuación, se muestra un diagrama Snakey, similar al de la Ilustración 4:

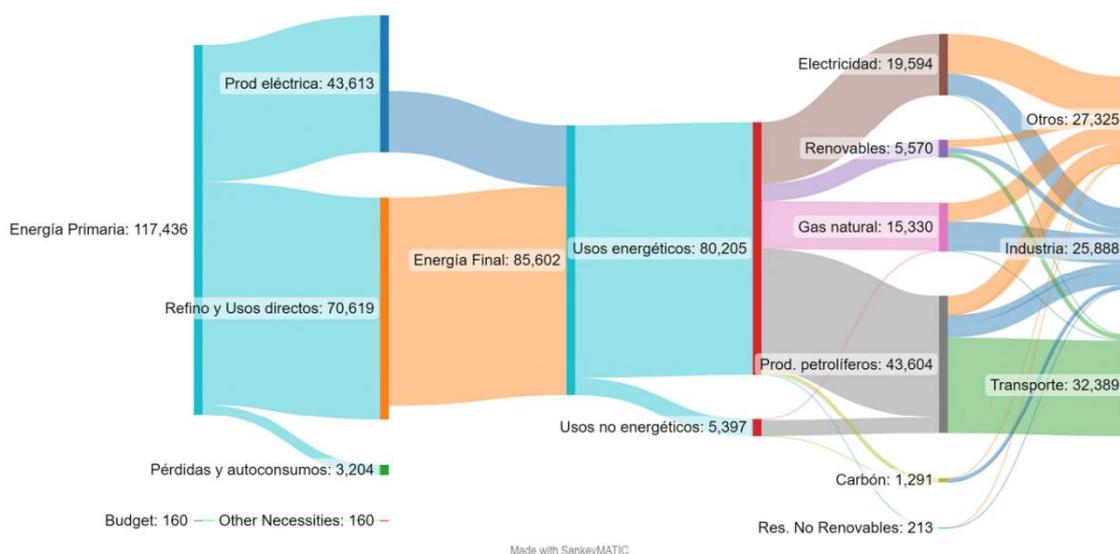


Ilustración 21. Diagrama Sankey de la energía en España. Cifras en ktep. (Fuente: [28])

El diagrama, que muestra los flujos de energía en términos de energía primaria, final, y usos energéticos y no energéticos; muestra que de la energía total empleada en España en 2021 (117.436 ktep), aproximadamente un cuarto se va a transporte, y un quinto a industria.

Por otro lado, cabe destacar la fuerte dependencia energética que tiene España, según un informe del Instituto Nacional de Estadística (INE), en 2021 España tuvo que importar el 69,1% de la energía consumida, lo cual es una cifra realmente elevada.

4.1.1 CONTEXTO POLÍTICO

En cuanto al contexto político, existen diversos planes de energía, tanto a nivel europeo como a nivel nacional enfocadas a la producción de energía y las fuentes utilizadas para ello (renovables o no renovables).

En primer lugar, a nivel europeo existen numerosas iniciativas relacionadas con la energía, entre las que destacan el REPowerEU, la Agenda 2030 y el Pacto Verde Europeo. En primer lugar, el REPowerEU es un “plan para reducir rápidamente la dependencia con respecto a los combustibles fósiles rusos y avanzar con rapidez en la transición ecológica” (Comisión Europea, 2022). El objetivo de este plan es realizar una transformación del sistema energético europeo actual para poner fin a la dependencia de los combustibles fósiles rusos y hacer frente a la crisis climática. Por otro lado, dentro de los objetivos de desarrollo sostenible, las Naciones Unidas redactaron la Agenda 2030, la cual hay que tenerla en cuenta a la hora de transformar el sistema energético actual. Los objetivos de la Agenda 2030 se recogen en la siguiente tabla:



Ilustración 22. Objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030. (Fuente: [30])

Con el fin de frenar el cambio climático y evolucionar hacia un marco de energías renovables, la Comisión Europea firmó el 11 de diciembre de 2019 el llamado Pacto Verde Europeo (Anexo – B). Este pacto proporciona herramientas para que la Unión Europea pueda cumplir los compromisos acordados en el Acuerdo de París, que entró en vigor en noviembre de 2016 y en el que participaron 55 países. El objetivo principal de este acuerdo es evitar un incremento de la temperatura media terrestre mayor de 2°C con respecto a niveles preindustriales (e idealmente mantenerlo por debajo de los 1,5°C).

Los tres principios clave en los que se centra el Pacto Verde Europeo son los siguientes:

- I) Garantizar un suministro energético seguro y asequible para la Unión Europea.
- II) Desarrollar un mercado de la energía de la UE plenamente integrado, interconectado y digitalizado.
- III) Priorizar la eficiencia energética, mejorar el rendimiento energético de los edificios y desarrollar un sector energético basado en gran medida en fuentes renovables.

Por otra parte, a nivel nacional existe el Plan Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021 – 2030, el cual persigue una reducción de un 23% de emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1990 [31].

4.1.2 ESTADO ENERGÉTICO ACTUAL

A continuación, se muestra un gráfico que permite ver la evolución del consumo de energía primaria en España, segmentado por las fuentes:

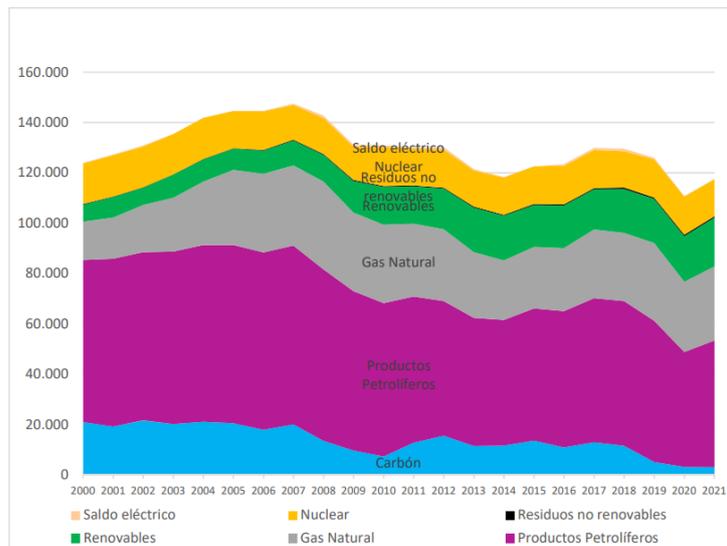


Ilustración 23. Consumo de energía primaria en España. (Fuente: [28])

Esta gráfica muestra una tendencia descendente en cuanto a consumo de gas natural, productos petrolíferos y carbón, lo cual es positivo y sigue los planes de transición energética comentados anteriormente. Por otra parte, el consumo de renovables ha aumentado. No obstante, todavía queda mucho camino por recorrer para llegar a ser “limpios” energéticamente.

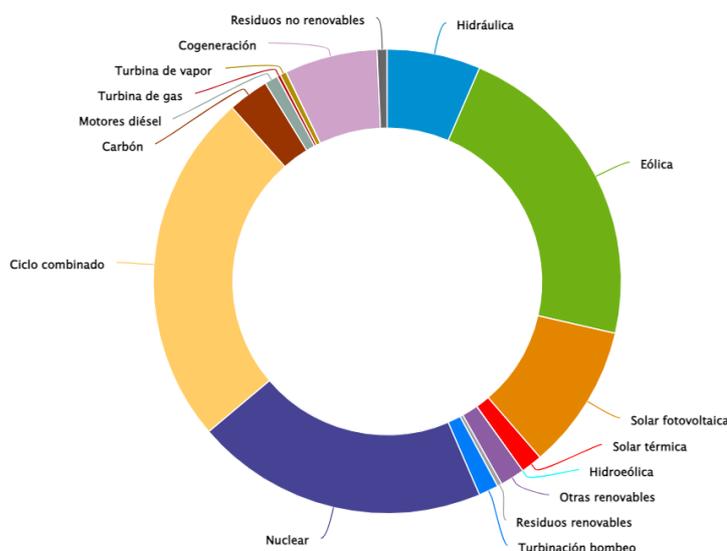


Ilustración 24. Cobertura de la demanda energética. (Fuente: [36][33])

La Ilustración 25 indica que aproximadamente el 60% de la energía consumida en España proviene de fuentes de energía no renovables, a pesar de que más de la mitad de la generación del país sí que se corresponde a energías renovables (**Error! Reference source not found.**). Esto determina que todavía hay margen de mejora en España, siendo necesaria una transición energética hacia energías renovables para cumplir tanto con los planes europeos como con los nacionales de transformación del sistema energético.

Por último, es importante mencionar la cantidad de energía eléctrica demandada en España. En el 2022, se registró una demanda total de energía eléctrica de 250.421 GWh.

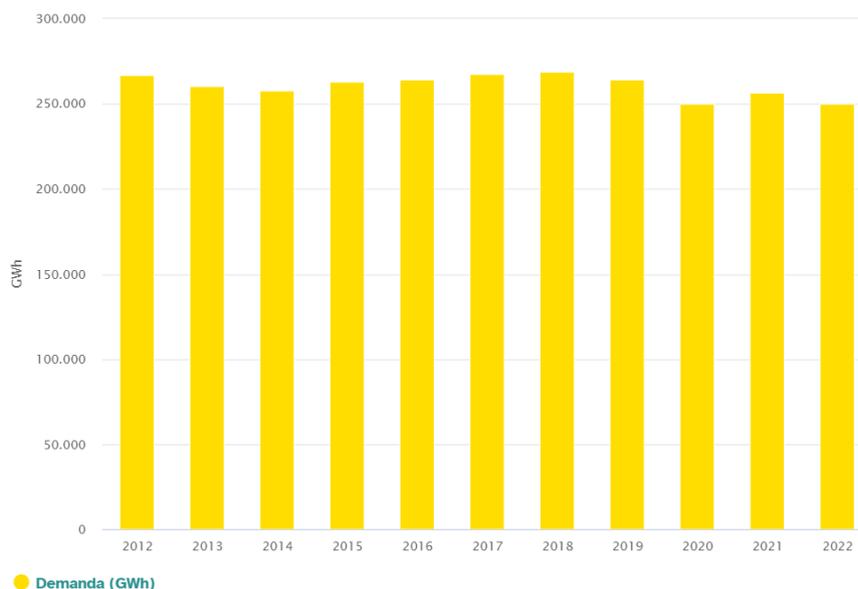


Ilustración 25. Tendencia de la demanda total de electricidad en España en los últimos años. (Fuente: [36])

4.2 PROPUESTA DEL MIX ENERGÉTICO ÓPTIMO

Para la propuesta del mix energético óptimo, es importante, primero, recalcar el papel que tiene la energía nuclear en este aspecto, ya que es clave para realizar una transición energética lo más limpia posible. Además, cabe mencionar las limitaciones de las energías renovables, ya que, si no tuvieran limitaciones y siguiendo el contexto político enfocado hacia la no contaminación, lo lógico sería utilizar sólo este tipo de tecnología.

4.2.1 PAPEL DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Para cumplir los objetivos del Pacto Verde Europeo y abandonar las centrales energéticas convencionales, es crucial producir energía de forma masiva y sostenible. La energía nuclear, especialmente la fisión nuclear, desempeña un papel clave en esta transición. El público a menudo no entiende la sostenibilidad medioambiental de la tecnología nuclear, a pesar de reconocer su capacidad para generar cantidades sustanciales de energía. Sin embargo, la fisión nuclear es una de las fuentes de energía más limpias con un impacto medioambiental mínimo, ya que no causa contaminación atmosférica ni emite CO₂. Las centrales nucleares actualmente operativas evitan la emisión de más de dos mil millones de toneladas de CO₂ al año. La huella medioambiental de la energía nuclear procede principalmente de la extracción de uranio, pero se espera que disminuya considerablemente con la comercialización prevista de reactores rápidos en las próximas décadas.

Además, con el objetivo de apoyar las energías renovables, muchos países dan prioridad a estas fuentes para la distribución a la red. Esto hace necesario que otras instalaciones productoras de energía ajusten con frecuencia su producción para compensar la variabilidad de estas fuentes. Esta intermitencia penaliza a las centrales nucleares más que a las plantas que queman combustibles fósiles porque el componente de coste de capital (o de inversión) del primero es relativamente alto y el coste del combustible es bajo¹, mientras que para este último ocurre lo contrario, especialmente para plantas de gas natural de ciclo abierto (como muestra la Ilustración 26). Una de las principales consecuencias de este modo de producción es el aumento de gases de efecto invernadero, debido al aumento de la producción de centrales de combustibles fósiles en detrimento de la producción de las centrales nucleares. Otra consecuencia es la pérdida de estabilidad de generación la red eléctrica que se tratará con más profundidad en el siguiente capítulo.

¹ Para ser rentables, las centrales nucleares deben permanecer activas durante un largo y continuo periodo de tiempo

	Nuclear (%)	Carbón (%)	Gas (%)
Capital	59	42	17
Combustible	15	41	76
Operación y mantenimiento	26	17	7

Ilustración 26. Desglose de costes de generación. (Fuente:[35])

Además, otra de las ventajas de la energía nuclear es la baja dependencia que presenta ante el coste de combustible. Actualmente, técnicas como el fracking, hacen que combustibles como el gas natural o el petróleo tengan precios relativamente bajos, lo que provoca que las centrales de combustibles fósiles puedan tener un precio atractivo. Sin embargo, esto cambiará en un futuro no muy lejano debido al aumento del precio de este tipo de combustibles por su escasez mundial. Por tanto, las centrales nucleares destacan en este aspecto debido a la ya mencionada baja sensibilidad ante aumentos del precio de combustible. En la siguiente tabla se resume de forma aproximada las sensibilidades de tres tipos de tecnologías (en cuanto a costes de generación) ante un aumento del 50% de sus respectivos combustibles.

Impacto de la subida del 50% del precio de combustible en los costes de generación		
Nuclear	Carbón	Ciclo combinado
3%	22%	38%

Ilustración 27. Sensibilidad ante el aumento del precio del combustible. (Fuente: [35])

4.2.2 LIMITACIONES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables, aunque ventajosas, aún no pueden ser la única fuente de energía debido a limitaciones inherentes:

Limitaciones geográficas: La producción de energía renovable suele tener lugar cerca de fuentes de energía primaria, como la energía hidroeléctrica, a lo largo de los ríos o la biomasa cerca de los bosques. Esto significa que la geografía limita dónde puede aprovecharse la energía renovable.

Menor densidad energética: Las energías renovables suelen tener una densidad energética inferior a la de las fuentes de energía tradicionales, por lo que requieren una mayor huella. Por ejemplo, la biomasa necesita una cantidad significativa de espacio para la fuente natural, y las turbinas eólicas, aunque visualmente llamativas, pueden integrarse menos en sus entornos. Se calcula que las fuentes renovables podrían abastecer alrededor del 50% de las necesidades energéticas totales de Estados Unidos, pero ello implicaría utilizar más del 17% de la superficie terrestre.

Intermitencia: La fiabilidad de las energías renovables se ve afectada por su naturaleza intermitente. La producción de energía eólica depende de la velocidad del viento, deteniéndose si es demasiado baja o demasiado alta para la seguridad. La energía solar fotovoltaica depende de la intensidad de la luz, que varía cada hora y cada estación y se ve afectada por la nubosidad. La energía hidroeléctrica es una excepción notable, que ayuda a países como Costa Rica a conseguir una combinación energética sostenible.

Alcance limitado de la energía no eléctrica: Las soluciones renovables para la energía no eléctrica, como el transporte y la calefacción, están menos desarrolladas y extendidas. Por ejemplo, la energía renovable de Costa Rica representa sólo el 50% del consumo total de energía en todos los sectores, incluidos la electricidad, la calefacción y el transporte.

Limitaciones en la red eléctrica: Por último, las energías renovables tienen ciertas limitaciones técnicas ingenieriles y financieras con la red eléctrica debido a su alta intermitencia, ya que el sistema del mercado eléctrico convencional aún no está preparado para funcionar sólo a base de generación renovable.

Los países con recursos hídricos limitados suelen estar lejos de alcanzar una combinación de energías renovables del 100%, a pesar de su elevada capacidad eólica y solar. Por ejemplo, Escocia y Dinamarca, líderes mundiales en energía eólica per cápita, seguían produciendo solo el 54% de su electricidad a partir de energías renovables en 2016, bastante menos que Costa Rica y Noruega.

4.2.3 PROPUESTA DE MIX

Una vez explicadas la importancia de la energía nuclear y las limitaciones de las energías renovables, se mostrará una composición de un mix energético óptimo para España en 2024. El objetivo de este mix energético óptimo es minimizar las emisiones de CO2 sin priorizar el aspecto económico (aunque para realizar una suposición razonable tiene que jugar cierto papel). Además, este mix energético está enfocado a cubrir la demanda de electricidad en España. Para determinar el mix, se han considerado los siguientes criterios (todos ellos dentro de España):

1. Contexto político de transición energética
2. Condiciones climáticas.
3. Situación geográfica.
4. Grado de desarrollo y capacidad de generación de cada una de las tecnologías renovables.
5. Limitaciones de las energías renovables.
6. Número de centrales nucleares en funcionamiento.
7. Número de centrales nucleares inoperantes.
8. Capacidad de producción de la energía nuclear en los países más desarrollados en este aspecto.

En España hay un total de 10 reactores nucleares (Anexo – C), de los cuales 7 están en funcionamiento. Sin embargo, la infraestructura de los 3 desmantelados se podría llegar a utilizar para volver a poner las centrales en funcionamiento, evitando así los elevados costes de inversión que supondría poner en funcionamiento desde cero las centrales nucleares (aunque lógicamente habría un coste para volver a ponerlas en funcionamiento). La media de potencia eléctrica instalada de los reactores en funcionamiento es de 1.051 MW, por lo que, para la determinación del mix óptimo, supondremos que las centrales nucleares inactivas estarán en funcionamiento, y la potencia instalada será de 1.051 MW. En ese caso, suponiendo que los 10 reactores están funcionando a potencia máxima (potencia instalada) con un rendimiento total del 90%, la potencia generada anual por la energía nuclear sería la siguiente:

$$P_G = 1051 \text{ MW} * 10 \text{ reactores} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 0,90 = 82.861 \text{ GWh}$$

Por otro lado, dado que España exporta aproximadamente 20.000 GWh (lo que equivale a un 7,9 % de su demanda total), de los cuales 10.000 GWh son producidos a partir de energías renovables y 5.000 GWh son producidos a partir de energía nuclear; para el mix óptimo se supondrá que esa energía exportada será utilizada para cubrir la demanda nacional, en detrimento de la energía producida a partir de combustibles fósiles. En el caso de las tecnologías renovables, esos GWh se corresponderán a cada tipo de energía de forma proporcional. Además, se supondrá que la demanda en España del año 2024 es igual a la demanda del año 2022, que es de 250.421 GWh. Por tanto, a partir de los datos de la Ilustración 24 (REE) que representa la cobertura de la demanda actual, el incremento de energía nuclear debido al uso de las centrales inactivas; y teniendo en cuenta que la energía de las exportaciones de energías renovables y nuclear se utilizará para consumo propio, el mix energético óptimo quedará de la siguiente manera:

	Tecnología	MIX ACTUAL (GWh)	DELTA (GWh)	MIX ÓPTIMO (GWh)
Renovables	Hidráulica	16277	1503	17780
	Eólica terrestre	55343	5760	61103
	Solar fotovoltaica	25293	2504	27797
	Solar térmica	3756	250	4007
	Otras renovables	5008	889	5897
Nuclear	Nuclear	50835	37284 ²	88120
Fósiles	Ciclo combinado	61854	-32438	29416
	Carbón	7012	-3506	3506
	Motores diésel	2254	-1002	1252
	Turbina de gas	501	-250	250
	Turbina de vapor	1002	-250	751
	Cogeneración	16027	-8514	7513
	Turbinación de bo	3506	-1252	2254
	Otros fósiles	1753	-977	776
Total		250421	0	250421

Ilustración 28. Tabla desglose de mix energético actual vs óptimo. (Fuente: Elaboración propia)

² 37

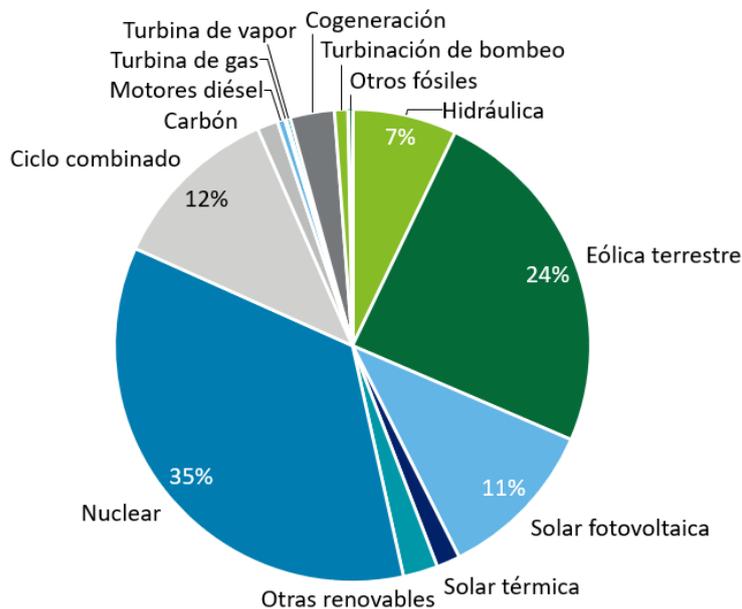


Ilustración 29. Gráfico de mix energético óptimo. (Fuente: Elaboración propia)

Así quedaría el mix energético óptimo según los criterios mencionados anteriormente y para un período de tiempo de corto plazo (1 año aproximadamente). En este mix la energía predominante es la nuclear, cuyo papel para la transición energética es clave. Además, el almacenamiento de la energía jugará un papel fundamental, ya que se reduciría drásticamente la alta intermitencia de las energías renovables y se vendería la energía almacenada al precio marginal (el del gas).

Capítulo 5. CONCLUSIONES

El estudio detallado de diversas tecnologías de energías renovables subraya su importancia crucial en la transición hacia un futuro energético sostenible. La necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles hace que estas tecnologías sean esenciales para alcanzar los objetivos medioambientales mundiales. Las continuas innovaciones en el campo de las energías renovables han dado lugar a mejoras significativas en la eficiencia y viabilidad de estas tecnologías. La energía solar, eólica, hidroeléctrica y otras formas de energía renovable están demostrando ser cada vez más competitivas en comparación con las fuentes de energía tradicionales.

A pesar de los avances, existen retos importantes, como la variabilidad de las fuentes de energía renovables, la necesidad de almacenamiento de energía a gran escala y cuestiones de viabilidad económica y financiera. Abordar estos retos es fundamental para el éxito de la integración de estas tecnologías en el mix energético. Las políticas gubernamentales y los marcos reguladores desempeñan un papel clave en la promoción de las energías renovables. Los incentivos, las subvenciones y las normativas favorables son cruciales para estimular la inversión y el desarrollo en este sector.

El futuro de las energías renovables es prometedor, con un considerable potencial de expansión y adopción en todo el mundo. A medida que avance la tecnología y disminuyan los costes, es probable que estas fuentes de energía desempeñen un papel aún más dominante en el panorama energético mundial. En conclusión, las energías renovables no sólo son esenciales para combatir el cambio climático, sino que también representan una importante oportunidad económica y tecnológica. Aunque hay retos que superar, el progreso constante y el creciente apoyo mundial indican un futuro brillante para las energías renovables.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). El cambio climático. <<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/cumbre-cambio-climatico-cop21/el-cambio-climatico/>>
- [2] Ministerio de Energía y Minería de Argentina. (2020). CURSO DE CAPACITACIÓN DO- CENTE USO RESPONSABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA. Subsecretaría de ahorro y eficiencia energética. <<https://scripts.minem.gob.ar/octopus/archivos.php?file=7658>>.
- [3] International Energy Agency. (2019). World Energy Outlook 2019. IEA. <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/1f6bf453-3317-4799-ae7b-9cc6429c81d8/Eng-lish-WEO-2019-ES.pdf>>.
- [4] Gil, S. (2008). Energía y Sociedad. ECyT – UNSAM. <https://www.fisicarecreativa.com/papers_sg/papers_sgil/Gas/energia_UNSAM_2k8.pdf>.
- [5] Gil, S. (2008). Energía y Sociedad. ECyT – UNSAM. <https://www.fisicarecreativa.com/papers_sg/papers_sgil/Gas/energia_UNSAM_2k8.pdf>.
- [6] Historical Trends in Global Energy Consumption. (2010). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5571929>>.
- [7] Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, Farrerons Vidal, O., Olmedo Torre, N., Caldú Fogued, E., & Martínez Pérez, J. (2012). El aporte de las energías renovables a la situación energética mundial. <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28530/2012-11+Aporte+de+las+energ%C3%ADas+renovables+a+la+situaci%C3%B3n+energ%C3%A9tica+mundial-DEF.pdf?sequence=1>>.
- [8] International Energy Agency. (2010). IEA Sankey Diagram. IEA Sankey Diagram. <<https://www.iea.org/sankey/#?c=World&s=Final%20consumption>>.
- [9] Repsol. (2023). Tipos de energía renovable. <<https://www.repsol.com/es/conocenos/que-hacemos/desarrollo-energias-renovables/tipos-energia-renovable/index.cshtml>>
- [10] CEMAER. (2019). Energía no renovable. <<https://www.cemaer.org/energia-no-renovable/>>
- [11] BP global. (2021). Statistical Review of World Energy. Energy economics. <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>
- [12] Iberdrola. (2023). Energía solar fotovoltaica. <<https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-solar-fotovoltaica>>
- [13] World Energy Trade. (2023). Enel Green Power pone en marcha la planta solar

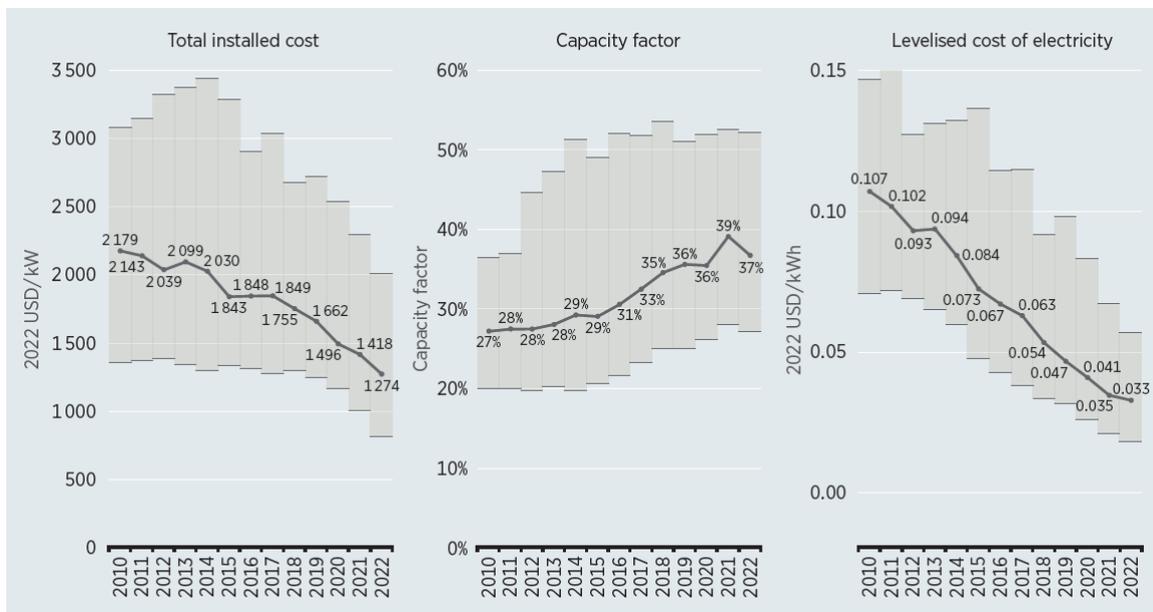
- fotovoltaica Nou Biniatria en Mallorca, España.
<<https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-solar/enel-green-power-pone-en-marcha-la-planta-solar-fotovoltaica-nou-biniatria-en-mallorca-espana>>
- [14] Repsol. (2023). Energía solar térmica.
<<https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/energia-solar-termica/>>
- [15] Gobierno de Canarias. (2017). Centrales termosolares.
<<https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2017/11/25/centrales-termosolares/>>
- [16] Iberdrola. (2023). Energía eólica.
<<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>>
- [17] Ormazabal. (2023). ¿Sabes cómo funciona un parque eólico terrestre?
<<https://www.ormazabal.com/sabes-como-funciona-un-parque-eolico-terrestre/>>
- [18] Endesa. (2021). Energía hidráulica. <<https://www.endesa.com/es/la-carera/energias-renovables/energia-hidraulica>>
- [19] Ormazabal. (2023). Energía hidroeléctrica: ¿Qué es y cómo funciona?
<<https://www.ormazabal.com/energia-hidroelectrica-que-es-y-como-funciona/>>
- [20] Iberdrola. (2023). Energía geotérmica. <
<https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-empresa/energias-renovables/energia-geotermica>>
- [21] Fundación Endesa. (2023). Central de biomasa.
<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-de-biomasa>
- [22] Technology Alexa. (2010). Centrales térmicas de biomasa.
<<https://technology-alex.blogspot.com/2010/01/centrales-termicas-de-biomasa.html>>
- [23] Repsol. (2023). Energía mareomotriz. <<https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-mareomotriz/index.cshtml>>
- [24] Linea Verde Ceuta. (2023). Tipos de centrales para producir energía mareomotriz. <<http://www.lineaverdeceutatrace.com/lv/consejos-ambientales/Energia-mareomotriz/Tipos-de-centrales-para-producir-energia-mareomotriz.asp>>
- [25] BBVA. (2023). ¿Qué es la energía undimotriz? Descubre sus características.
<<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-undimotriz-descubre-sus-caracteristicas/>>
- [26] Repsol. (2023). Energía undimotriz. <<https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-undimotriz/index.cshtml>>
- [27] International Renewable Energy Agency. (2022). Renewable Power Generation Costs in 2022. IRENA.
- [28] Secretaría de Estado de Energía. (2023). Balance energético de España 1990-2021. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- [29] Comisión Europea. (2022). REPowerEU: Plan para reducir rápidamente la dependencia con respecto a los combustibles fósiles rusos y avanzar con

- rapidez en la transición ecológica.
<https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_22_3131>
- [30] Naciones Unidas. (2015). Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>>
- [31] MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. (2023). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021 – 2030. <<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html>>
- [32] Red Eléctrica. (2023). La demanda de energía eléctrica de España desciende un 5,7% en junio. <<https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2023/07/la-demanda-de-energia-electrica-de-espana-desciende-un-5-7-en-junio-2023>>
- [33] Instituto Nacional de Estadística. (2021). Energía.
- [34] International Energy Agency. (2019). World Energy Outlook 2019. IEA. <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/1f6bf453-3317-4799-ae7b-9cc6429c81d8/English-WEO-2019-ES.pdf>>
- [35] Red Eléctrica Española. (2022). Un papel protagonista en la transición energética. <<https://www.ree.es/es/red21/un-papel-protagonista-en-la-transicion-energetica>>
- [36] Red Eléctrica Española. (2023). Evolución de la demanda. <<https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico/demanda/evolucion-demanda>>

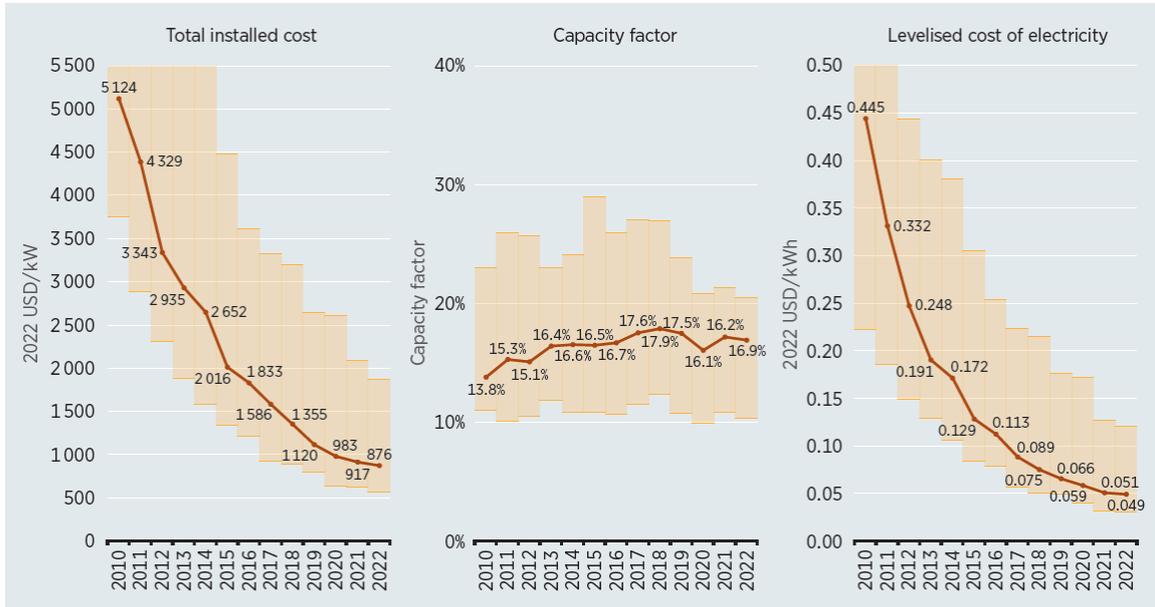
ANEXO I

A. Gráficas de costes de instalación (“installed costs”), factor de capacidad (“capacity factor”) y LCOE (“levelised cost of energy”) de las principales tecnologías (*Fuente: [27]*).

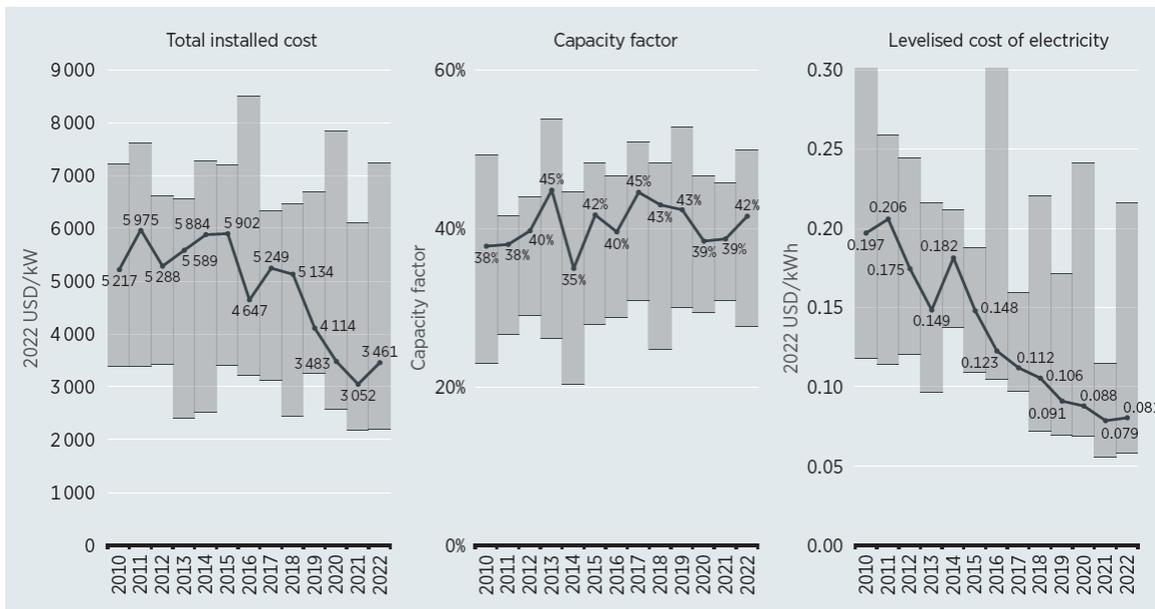
Eólica terrestre:



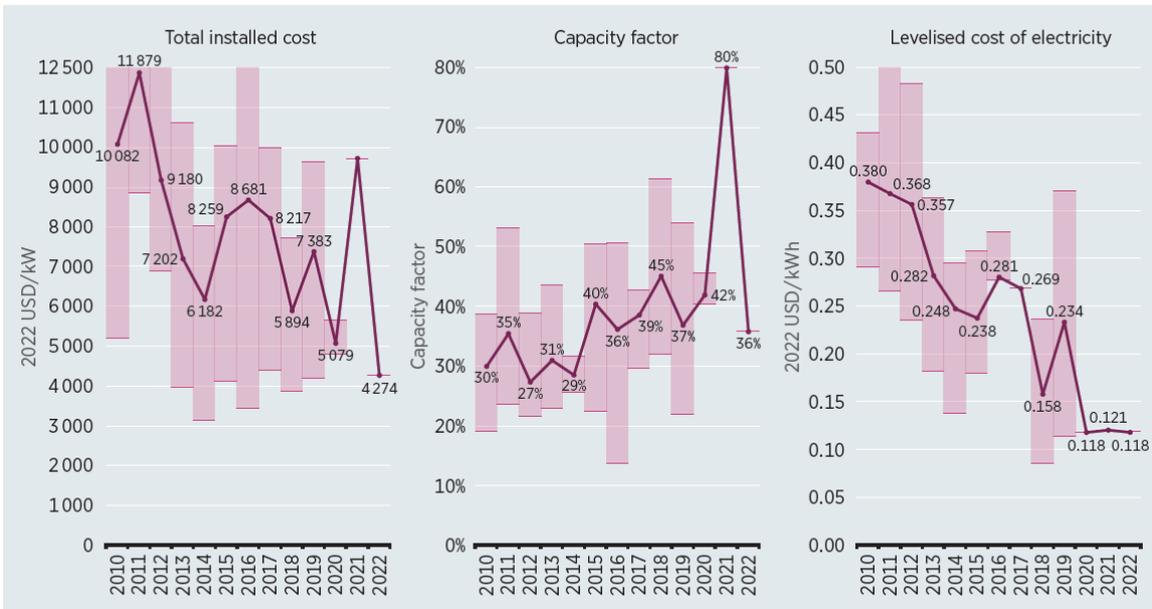
Solar fotovoltaica:



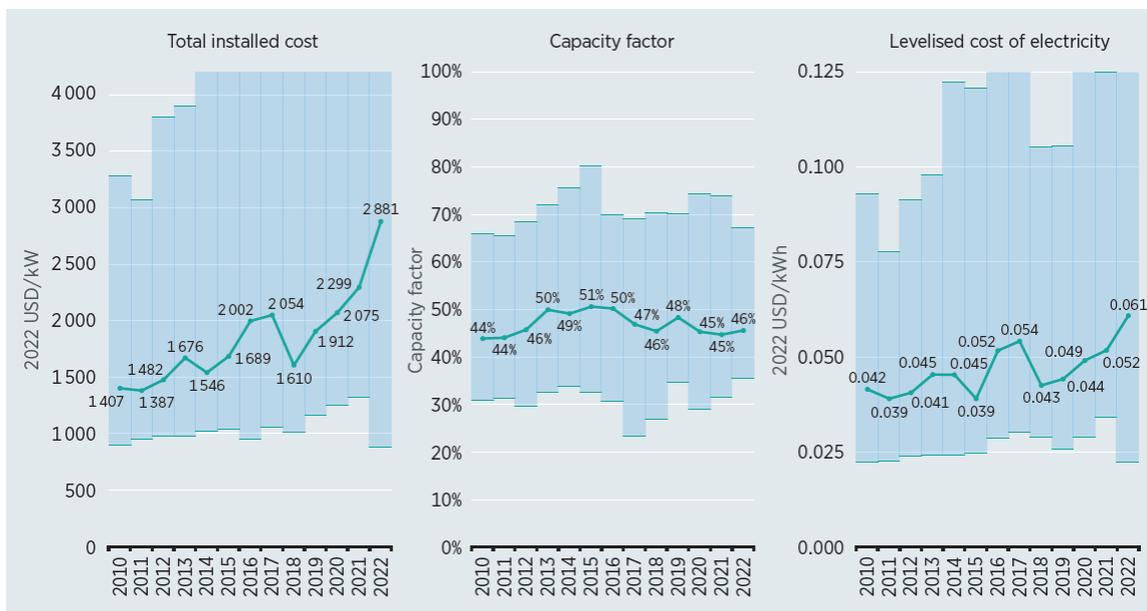
Eólica marina:



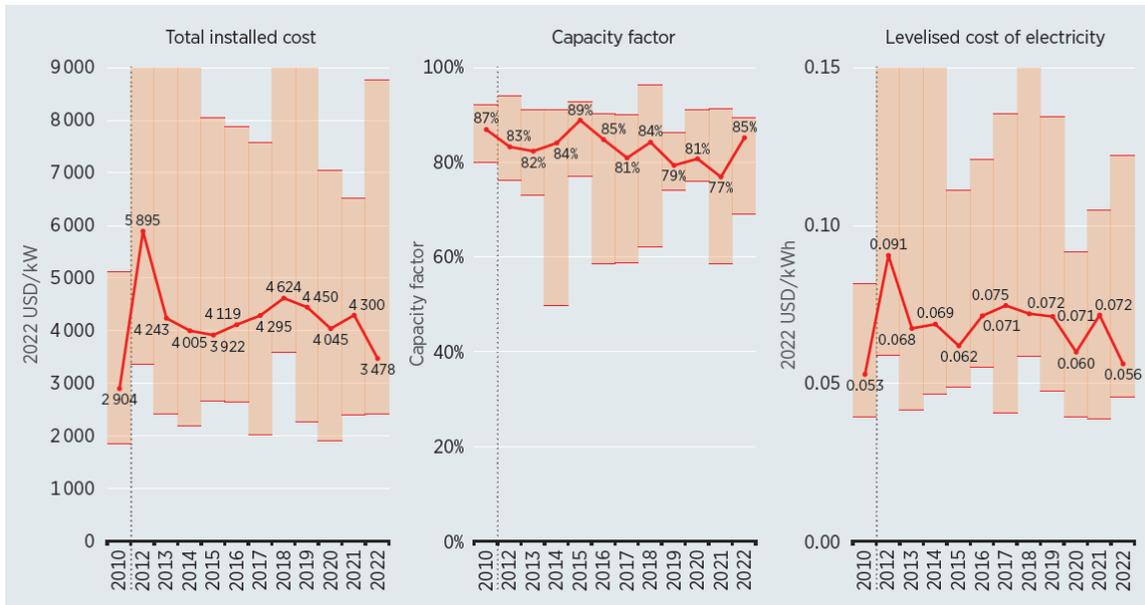
Solar térmica:



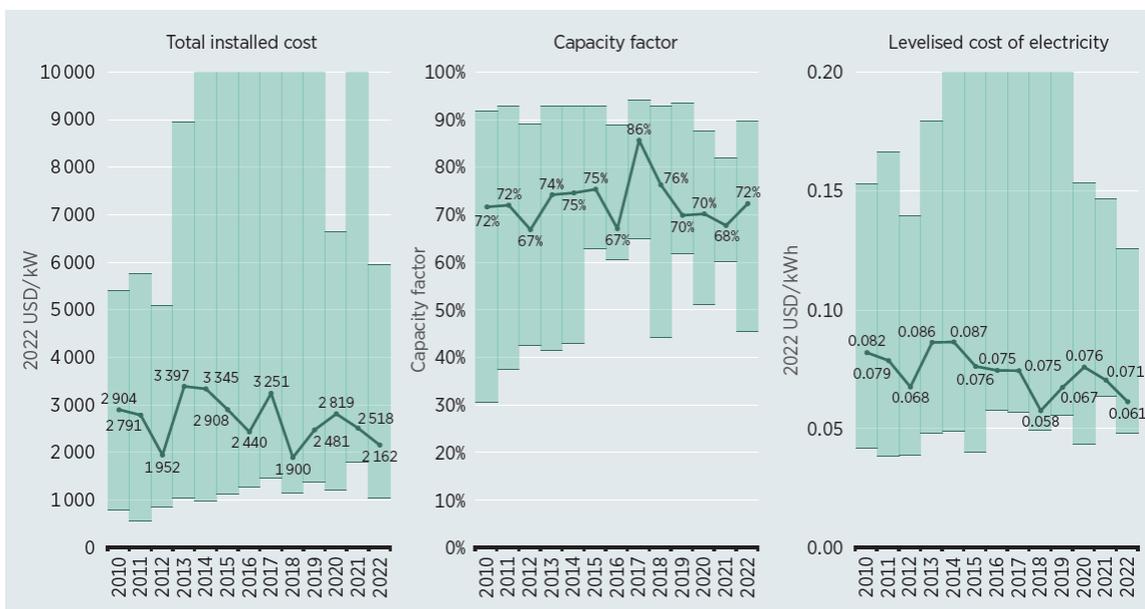
Hidroeléctrica:



Geotérmica:



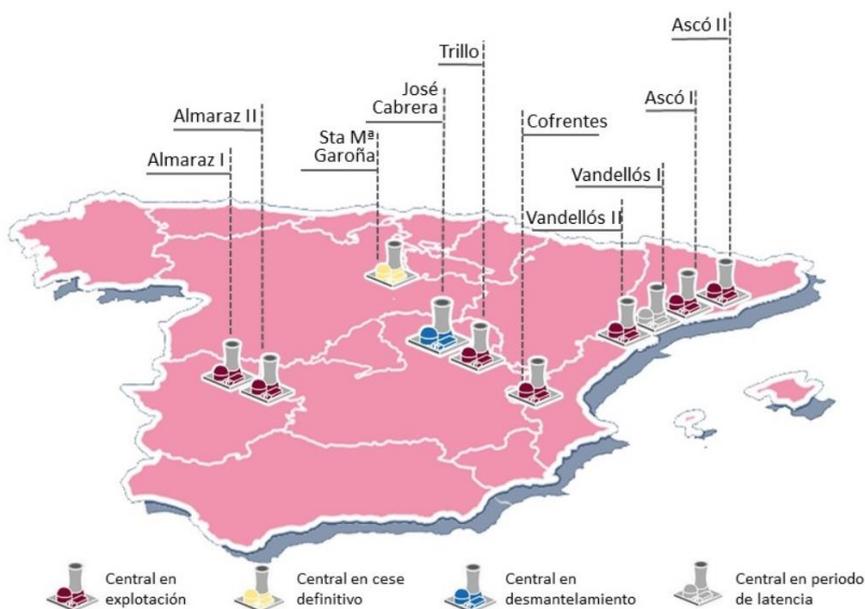
Biomasa:



B. Objetivos del Pacto Verde Europeo (*European Commission*)

OBJETIVOS ENERGÉTICOS EUROPEOS					
Objetivos 2020	20% reducción de emisiones GEI frente a niveles de 1990	20% de energías renovables en la UE	20% de mejora de la eficiencia energética		
Objetivos 2030	40% reducción de emisiones GEI frente a niveles de 1990	32% de energías renovables en la UE	32,5% de mejora de la eficiencia energética	15% para interconexiones eléctricas	
Objetivos 2050	85-90% reducción de emisiones GEI frente a niveles de 1990				

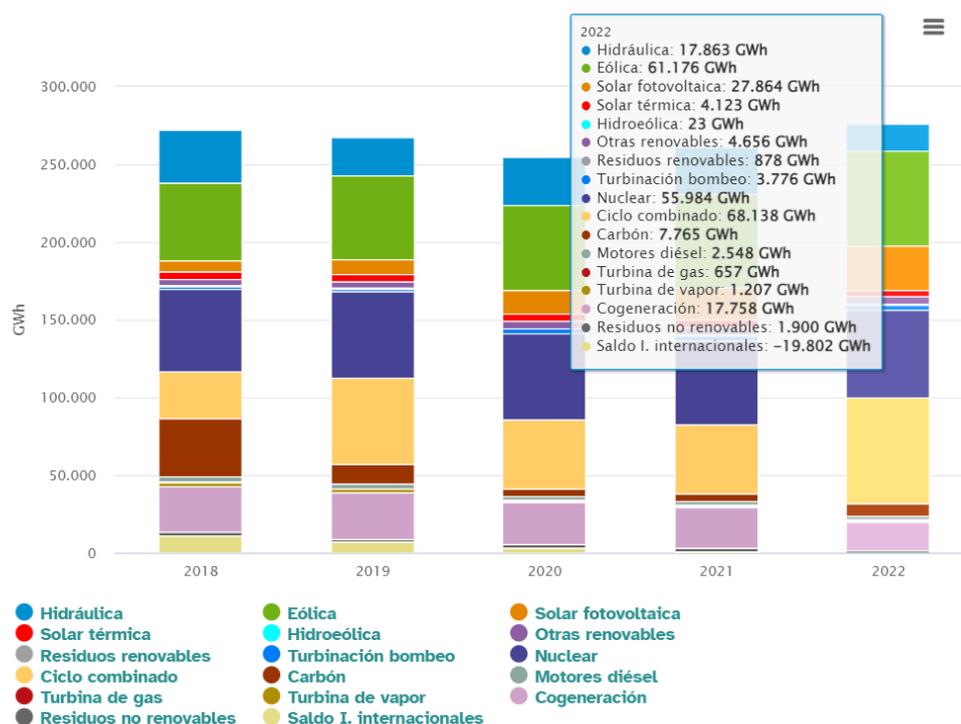
C1. Mapa de ubicación de las centrales nucleares en España (*Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*)



C2. Datos de los reactores nucleares en funcionamiento (*Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*)

REACTOR	EMPLAZAMIENTO	TITULAR	PROPIETARIOS	POTENCIA ELÉCTRICA(MW)	TIPO	AÑO INICIO EXPLOTACIÓN COMERCIAL
Almaraz I	Almaraz Cáceres	Centrales Nucleares Almaraz-Trillo, AIE. (CNAT)	Iberdrola Generación Nuclear, S.A. (52,7%), ENDESA Generación, S.A. (36,0%), Naturgy Energy Group, S.A. (11,3%)	1.049,40	P.W.R.	1983
Almaraz II	Almaraz Cáceres	Centrales Nucleares Almaraz-Trillo, AIE. (CNAT)	Iberdrola Generación Nuclear, S.A. (52,7%), ENDESA Generación, S.A. (36,0%), Naturgy Energy Group, S.A. (11,3%)	1.044,50	PWR	1984
Ascó I	Ascó Tarragona	Asociación Nuclear Ascó-Vandellós II, AIE. (ANAV)	Endesa Generación S.A. (100%)	1.032,50	P.W.R.	1984
Ascó II	Ascó Tarragona	Asociación Nuclear Ascó-Vandellós II, AIE. (ANAV)	Endesa Generación, S.A. (85%) Iberdrola Generación Nuclear, S.A. (15%)	1.027,21	P.W.R.	1986
Cofrentes	Cofrentes Valencia	Iberdrola Generación Nuclear, S.A.	Iberdrola Generación Nuclear, S.A.	1.092,02	B.W.R.	1985
Vandellós II	Vandellós I L'Hospitalet de l'Infant Tarragona	Asociación Nuclear Ascó-Vandellós II, AIE. (ANAV)	Endesa Generación, S.A. (72%), Iberdrola Generación Nuclear, S.A. (28%)	1.087,14	P.W.R.	1988
Trillo	Trillo Guadalajara	Centrales Nucleares Almaraz-Trillo, AIE. (CNAT)	Iberdrola Generación Nuclear, S.A. (49%), Naturgy Energy Group, S.A. (34,5%), EDP HC Energía, S.A. (15,5%), Endesa Generación, S.A. (1%)	1.066,00	P.W.R.	1988
Total				7.398,77		

D. Detalle de la evolución de la cobertura de la demanda eléctrica en España (Fuente: Red Eléctrica Española)



Año	Hidráulica	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar térmica	Hidroeléctrica	Otras renovables	Residuos renovables	Turbina de bombeo
2018	34117.24	49581.49	7766.178425	4424.326674	23.655544	3557.43911	874.075245	1993.99601
2019	24719.02	54245.06	9252.018881	5166.431145	23.248718	3617.7139	889.81375	1645.505104
2020	30631.72	54906.25	15302.14473	4538.31013	19.540227	4481.581196	725.646073	2751.440465
2021	29626.01	60525.66	20981.0433	4705.524869	23.098239	4719.873222	877.940731	2649.324261
2022	17863.04	61175.59	27864.34191	4123.275375	22.880844	4656.293982	877.707563	3775.566857

Año	Nuclear	Ciclo combinado	Carbón	Motores diésel	Turbina de gas	Turbina de vapor	Cogeneración	Residuos no renovables	Saldo I. internacionales
2018	53198	30044.4672	37277	3178.179141	1049.279011	2455.432297	29006.75724	2434.962786	11102.31115
2019	55824	55241.97022	12671	2836.053144	670.532077	2189.010668	29615.085	2222.463307	6862.325049
2020	55758	44022.85539	5020.7	2399.492159	406.582811	1387.607524	27030.31333	2016.181467	3279.584887
2021	54041	44500.09933	4983.1	2517.424107	423.579904	1108.055957	26090.49324	2238.741303	852.439911
2022	55984	68137.54716	7765.2	2548.203572	657.472545	1207.234576	17757.67023	1899.766531	-19801.73737