



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Química

Análisis de distintos escenarios de generación de energía eléctrica

Autor:

Marcos Trespacios, Alberto

Tutores:

**Chamorro Camazón, César
Lozano Martín, Daniel
Ingeniería Energética y
Fluidomecánica**

Valladolid, abril 2021.

Resumen

La generación eléctrica representa una parte importante del consumo de energía primaria de un país, lo que genera importantes emisiones de gases efecto invernadero.

Este trabajo, además de describir la situación actual del sistema eléctrico español y las emisiones que genera, pretende analizar el sistema eléctrico para distintos escenarios futuros en 2030 y 2050, cumpliendo los objetivos impuestos por la Unión Europea y por España. Para ello, se utilizan dos metodologías diferentes para la estimación de las emisiones asociadas a la generación eléctrica en cada uno de los escenarios analizados, de modo que se determine cuál es el escenario más adecuado.

Se ha concluido que la metodología LCA (Life Cycle Assessment) es la más adecuada, ya que considera las emisiones de una forma global, incluyendo todas las etapas implicadas en el proceso. También se concluye que existen distintos escenarios posibles que cumplen los objetivos tanto europeos como españoles.

Palabras clave

Sistema eléctrico, emisiones CO₂ equivalente, Life Cycle Assessment (LCA), Red Eléctrica Española (REE).

Abstract

Electricity generation represents an important part of a country's primary energy consumption, which generates significant greenhouse gas emissions.

This work, in addition to describing the current situation of the Spanish electricity system and the emissions it generates, aims to analyse the electricity system for different future scenarios in 2030 and 2050, complying with the objectives imposed by the European Union and Spain. To this end, two different methodologies are used to estimate the emissions associated with electricity generation in each of the scenarios analysed, to determine which is the most appropriate scenario.

It has been concluded that the LCA (Life Cycle Assessment) methodology is the most appropriate, as it considers emissions globally, including all the stages involved in the process. It is also concluded that there are different possible scenarios that meet both European and Spanish objectives.

Keywords

Electricity system, CO₂ equivalent emissions, Life Cycle Assessment (LCA), Red Eléctrica Española (REE).

Índice

Resumen	
Palabras clave	
Abstract	
Keywords	
Índice de figuras y tablas	
Nomenclatura	
1. Introducción y objetivos	1
1.1. Contextualización del trabajo.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estructura	5
2. Energía eléctrica dentro de los flujos de energía de un país	7
2.1. Fuentes de energía y utilización final de la energía en el mundo	9
2.1.1. Fuentes de energía.....	9
2.1.2. Energías no renovables.....	9
2.1.3. Energías renovables.....	10
2.1.4. Utilización final de la energía.....	10
2.2. Fuentes de energía y utilización final de la energía en España	17
2.2.1. Fuentes de energía en España.....	19
2.2.2. Utilización final de la energía en España	20
2.2.3. Transformaciones intermedias en España	22
3. Sistemas de producción de energía eléctrica	25
3.1. Energía hidráulica	27
3.1.1. Hidráulica convencional.....	28
3.1.2. Hidráulica de bombeo puro	29
3.1.3. Hidráulica mixta.....	29
3.2. Energía nuclear.....	29
3.2.1. Combustible.....	30
3.2.2. Responsabilidad medioambiental.....	31
3.3. Carbón (Fuel + Gas).....	31
3.3.1. Aspectos medioambientales.....	32

3.4.	Ciclo combinado.....	33
3.4.1.	Aspectos medioambientales.....	34
3.5.	Energía eólica.....	35
3.5.1.	Tipos de energía eólica.....	37
3.5.2.	Aspecto medioambiental.....	38
3.6.	Energía solar.....	39
3.6.1.	Energía solar fotovoltaica.....	39
3.6.2.	Energía solar térmica.....	40
3.7.	Otras renovables.....	43
3.7.1.	Energía a partir de biomasa.....	43
3.7.2.	Energía geotérmica.....	44
3.8.	Cogeneración.....	45
3.8.1.	Clasificación de los sistemas de cogeneración.....	46
3.8.2.	Aspectos medioambientales.....	47
3.9.	Aspectos energéticos y medioambientales.....	48
3.9.1.	Energía hidráulica.....	48
3.9.2.	Energía nuclear.....	49
3.9.3.	Carbón.....	49
3.9.4.	Ciclo combinado.....	50
3.9.5.	Energía eólica.....	50
3.9.6.	Energía solar.....	51
3.9.7.	Biomasa.....	52
3.9.8.	Cogeneración.....	52
3.10.	Aspectos económicos.....	53
4.	Problemas medioambientales de la producción de energía eléctrica.....	57
4.1.	Problemas medioambientales.....	59
4.2.	Emisiones asociadas a la producción de energía eléctrica.....	60
4.3.	Metodología para las emisiones de CO ₂ equivalente de la generación eléctrica en España.....	61
4.3.1.	Metodología REE.....	61
4.3.2.	Metodología LCA.....	63
4.3.3.	Metodología LCA extra.....	65

4.4.	Otros problemas medioambientales	66
4.4.1.	Óxidos de azufre	66
4.4.2.	Óxidos de nitrógeno.....	66
4.4.3.	Residuos nucleares	67
5.	Estructura de la producción de energía eléctrica en España	69
5.1.	Situación actual de sistema eléctrico de la España peninsular	71
5.1.1.	Potencia instalada.....	72
5.1.2.	Producción eléctrica	73
5.1.3.	Estructura.....	74
5.2.	Evolución histórica del sistema eléctrico de la España peninsular	76
5.2.1.	Potencia instalada.....	76
5.2.2.	Producción eléctrica	77
5.2.3.	Estructura.....	79
5.3.	Cálculo de factores de utilización. Límites y condicionantes	81
5.3.1.	Factor de utilización	81
5.3.2.	Límites y condicionantes.....	83
5.4.	Cálculo del factor de emisiones de CO ₂ equivalente global y por tecnología	84
5.4.1.	Factores de emisiones de CO ₂ equivalente por tecnología	84
5.4.2.	Factor de emisiones de CO ₂ equivalente global.....	87
6.	Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050.....	91
6.1.	Objetivos de la UE y de España.....	93
6.1.1.	Medidas sobre clima y energía hasta 2020.....	93
6.1.2.	Marcos sobre clima y energía para 2030.....	93
6.1.3.	Horizonte 2050.....	94
6.1.4.	Conclusiones de los objetivos.....	94
6.2.	Metodología.....	94
6.3.	Análisis de escenarios futuros	97
6.3.1.	Escenario 1	97

6.3.2. Escenario 2.....	104
6.3.3. Escenario 3.....	111
6.4. Comparativa de los escenarios	117
7. Conclusiones.....	121
Bibliografía	125

Índice de figuras y tablas

Índice de figuras

Figura 2.1: Diagrama de Sankey del balance energético mundial del año 2018 [3].....	11
Figura 2.2: Distribución del consumo final de energía en el sector industrial a nivel mundial en el año 2018 [3].	14
Figura 2.3: Distribución del consumo final de energía en el sector del transporte a nivel mundial en el año 2018 [3].....	14
Figura 2.4: Distribución del consumo final de energía en otros sectores a nivel mundial en el 2018 [3].....	15
Figura 2.5: Distribución del consumo final de energía en usos no energéticos a nivel mundial en el 2018 [3].	16
Figura 2.6: Diagrama de Sankey del balance energético en España del año 2018 [3].....	18
Figura 2.7: Distribución del consumo final de energía en el sector industrial en España en el 2018 [3].....	20
Figura 2.8: Distribución del consumo final de energía en el sector del transporte en España en el 2018 [3].	21
Figura 2.9: Distribución del consumo final de energía en otros sectores en España en el 2018 [3].....	21
Figura 2.10: Distribución del consumo final de energía en usos no energéticos en España en el 2018 [3].	22
Figura 2.11: Distribución de la generación de energía eléctrica en España en el 2018 [3].	22
Figura 2.12: Distribución de la generación de energía eléctrica a nivel mundial en el 2018 [3].....	23
Figura 3.1: Esquema de una central hidráulica [10].....	28
Figura 3.2: Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo [10].	29
Figura 3.3: Esquema de una central nuclear [10].....	30
Figura 3.4: Esquema de una central térmica convencional [10].	32
Figura 3.5: Esquema de una central de ciclo combinado [10].....	34
Figura 3.6: Potencia instalada a nivel europeo en el 2019 [28].....	36
Figura 3.7: Esquema de aerogenerador de eje horizontal [30].....	37
Figura 3.8: Esquema de una central solar fotovoltaica [10].	40
Figura 3.9: Central de colectores parabólicos distribuidos [35].....	41
Figura 3.10: Central de torre central [35].	42
Figura 3.11: Gráfica del LCOE para cada tipo de tecnología [62].....	54
Figura 4.1: Distribución de emisiones brutas de CO ₂ equivalente en 2018 por sector [65].....	60
Figura 4.2: Distribución de emisiones brutas de GEI en 2018 según el tipo de gas [65].....	61
Figura 4.3: Gráfica de las emisiones de CO ₂ equivalente asociadas a la generación de electricidad en España según la metodología REE [67].	62

Figura 4.4: Gráfica de las emisiones de CO ₂ equivalente asociadas a la generación de electricidad en España según la metodología LCA [12].	64
Figura 4.5: Gráfica estimada de las emisiones de CO ₂ equivalente asociadas a la generación de electricidad en España según la metodología LCA extra [12], [67].	65
Figura 5.1: Esquema básico del Sistema Eléctrico en España [67].	71
Figura 5.2: Gráfico de la estructura de potencia instalada en España en el 2020 [67].	74
Figura 5.3: Gráfico de la estructura de la generación eléctrica en España en el 2020 [67].	75
Figura 5.4: Gráfico de la potencia instalada en España desde 1990 a 2020 [67].	76
Figura 5.5: Gráfico de la generación eléctrica en España desde 1990 a 2020 [67].	78
Figura 5.6: Gráfico de la estructura de potencia instalada en España desde 1990 a 2020 [67].	79
Figura 5.7: Gráfica de la estructura de generación eléctrica en la España peninsular desde 1990 a 2020 [67].	80
Figura 5.8: Gráfica del factor de capacidad de las tecnologías en la España peninsular desde 1990 a 2020 [67].	82
Figura 5.9: Factor de emisiones de CO ₂ equivalente global en España desde 1990 a 2020 según los distintos tipos de metodologías [12], [67].	89

Índice de tablas

Tabla 2.1: Datos de producción de energía mundial en el año 2018 [3].	13
Tabla 2.2: Datos de producción e importación de energía en España del año 2018 [3].	19
Tabla 3.1: Clasificación de los sistemas de cogeneración [44].	46
Tabla 5.1: Potencia instalada en España en el 2020 [67].	72
Tabla 5.2: Producción eléctrica en la España peninsular en el año 2020 [67].	73
Tabla 5.3: : Factores de emisiones de CO ₂ equivalente en la España peninsular según cada metodología [12], [67].	86
Tabla 5.4: Factor de emisiones de CO ₂ equivalente global en España desde 1990 a 2020 según los distintos tipos de metodologías [12], [67].	88
Tabla 6.1: Demanda eléctrica estimada para 2030 y 2050.	95
Tabla 6.2: Factores de emisión para cada tecnología utilizados en la predicción [12].	96
Tabla 6.3: Potencia instalada en 2020 y estimación de la potencia instalada para 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario.	99

Tabla 6.4: Factor de utilización en 2020 y su estimación para los años 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario.....	100
Tabla 6.5: Generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario.	101
Tabla 6.6: Estructura de la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario.	102
Tabla 6.7: Emisiones de CO ₂ equivalente asociadas a la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario	103
Tabla 6.8: Potencia instalada en 2020 y estimación de la potencia instalada para 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.	106
Tabla 6.9: Factor de utilización en 2020 y su estimación para los años 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.....	107
Tabla 6.10: Generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.....	108
Tabla 6.11: Estructura de la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.....	109
Tabla 6.12: Emisiones de CO ₂ equivalente asociadas a la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.....	110
Tabla 6.13: Potencia instalada en 2020 y estimación de la potencia instalada para 2030 y 2050 en la España peninsular en el tercer escenario.	112
Tabla 6.14: Factor de utilización en 2020 y su estimación para los años 2030 y 2050 en la España peninsular en el tercer escenario.	113
Tabla 6.15: Generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en España en el tercer escenario.	114
Tabla 6.16: Estructura de la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en España en el tercer escenario.	115
Tabla 6.17: Emisiones asociadas a la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en España en el tercer escenario.....	116
Tabla 6.18: Factores de emisión global para la predicción en 2030 y 2050 según las metodologías REE y LCA.	119

Nomenclatura

ACV:	Análisis del Ciclo de Vida
CCGT:	Combined Cycle Gas Turbine – Ciclo Combinado con Turbina de Gas
CCS:	Carbon Capture and Storage – Captura y almacenamiento de carbono
CSP:	Concentrated Solar Power – Energía solar concentrada
FE:	Factor de emisiones de CO ₂ equivalente
FU:	Factor utilización
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
GHG:	Greenhouse gases
GNC:	Gas Natural Comprimido
GNL:	Gas Natural Licuado
GWP:	Global Warming Potential - Potencial de calentamiento global
IEA:	International Energy Agency, Agencia Internacional de la Energía
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change - Panel Intergubernamental para el Cambio Climático
LCA:	Life-cycle assessment – Análisis del Ciclo de Vida
LCOE:	Levelized Cost of Electricity – Coste nivelado de electricidad
LTO:	Long-Term Operation – Operación a largo plazo
MCIA:	Motor alternativo de combustión interna
MITECO:	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
NOAA:	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos
ORC:	Organic Rankine Cycle - Ciclos Rankine Orgánicos
PV:	Photovoltaic - Fotovoltaica
RCE:	Relación Calor Electricidad
REE:	Red Eléctrica Española
SEI:	Sistema Español de Inventario de Emisiones
UE:	Unión Europea

1. Introducción y objetivos

1.1. Contextualización del trabajo

Desde tiempos inmemoriales el ser humano ha utilizado recursos energéticos para su propia supervivencia, desde el uso primitivo del fuego hasta las numerosas formas de aprovechamiento energético de hoy en día.

El descubrimiento en el siglo XVIII de combustibles como el carbón supuso una revolución para el sector industrial y energético, sin embargo, no fue hasta la Revolución Industrial, con la invención de la locomotora, que los combustibles fósiles, primero el carbón y más tarde los derivados del petróleo transformaron las condiciones de vida por aquel entonces, y eso tuvo las primeras repercusiones medioambientales.

En el siglo XIX tras la evolución de la tecnología se consiguió refinar petróleo, convirtiéndose en uno de los principales combustibles, responsable de una tercera parte de las emisiones contaminantes.

A finales del siglo XX, comenzaron a ser notables los efectos adversos de las emisiones de dióxido de carbono sobre el clima del planeta, y de este modo, se comenzó a coordinar una acción conjunta para detener el llamado calentamiento global.

Como resultado, se estableció la reunión anual de la Cumbre del Clima, que tuvo lugar por primera vez en Estocolmo (Suecia) en 1972, además en 1988 se fundó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) con el objetivo de dar un punto de vista más científico sobre el cambio climático.

A partir de ese momento, fueron desarrollándose acuerdos para disminuir el calentamiento global, dos de los más importantes fueron, el Protocolo de Kioto adoptado en 1997 por una serie de países donde se acordó la reducción de las emisiones, y el Acuerdo de París en 2015, que supuso el primer paso para evitar daños irreversibles en nuestro planeta limitando el aumento de la temperatura global promedio por debajo de 2°C.

Actualmente, Europa se ha fijado el propósito de la reducción del 55 % de emisiones contaminantes para 2030, con el objetivo final de la reducción del 100 % de las emisiones contaminantes para 2050.

El objetivo de este proyecto reside en el análisis de distintos escenarios para la generación de la energía eléctrica en la España peninsular, de modo que, centrándose en las emisiones de CO₂, se cumplan los objetivos programados por la Unión Europea (UE) y por España, centrandó el trabajo en distintos escenarios de generación de energía eléctrica para limitar las emisiones de CO₂ [1].

1.2. Objetivos

El objetivo general de este Trabajo Fin de Grado es analizar distintos escenarios futuros de generación eléctrica en la España peninsular y evaluar su impacto en relación al cumplimiento de los objetivos medioambientales de la UE y de España para 2030 y 2050. Para conseguir este objetivo general, se han planteado una serie de objetivos concretos que se detallan a continuación:

- Resaltar el papel de la energía eléctrica como vector energético dentro de los flujos de energía de un país, como un paso intermedio de gran importancia entre los recursos energéticos primarios (fósiles, nucleares y renovables) y la utilización final en los distintos sectores de la sociedad (industria, transporte y doméstico/servicios).
- Describir los sistemas de generación de energía eléctrica utilizados en la actualidad, analizando los parámetros energéticos y medioambientales que definen su funcionamiento, como son el rendimiento energético, el factor de utilización y el factor de emisiones.
- Cuantificar el impacto medioambiental de las distintas tecnologías de generación de energía eléctrica mediante algunas de las herramientas y metodologías disponibles en la actualidad para el cálculo de emisiones de CO₂ equivalente en la producción eléctrica.
- Analizar los objetivos medioambientales para 2030 y 2050 propuestos por la UE y asumidos por España en relación a las emisiones de gases de efecto invernadero en general y analizar el impacto del cumplimiento de esos objetivos en la futura estructura de la generación de energía eléctrica.
- Recopilar datos para analizar la estructura actual de la generación de energía eléctrica en la España peninsular y estudiar su evolución en los últimos 30 años. Estos datos proporcionarán una base sólida a partir de la cual estimar la evolución de la demanda y plantear distintas alternativas futuras de estructura de la producción, capaces de satisfacer esa demanda y cumplir con los objetivos medioambientales propuestos.
- Proponer distintos escenarios de generación de energía eléctrica para la España peninsular para 2030 y 2050 y analizar su impacto medioambiental mediante distintas herramientas, comprobando el cumplimiento de los objetivos medioambientales.

La metodología utilizada en este proyecto se basa en la utilización de datos recogidos en la bibliografía, de modo que nos permita realizar una predicción de la estructura de producción de energía en la España peninsular

para 2030 y 2050, con el fin de cumplir los objetivos determinados por la UE y por España en lo referente a la generación eléctrica.

1.3. Estructura

La memoria de este proyecto está organizada en siete capítulos expuestos a continuación:

El primer capítulo, se utiliza como una introducción al tema tratado, justificando la necesidad de realizar este proyecto, y contextualizando la situación energética en el mundo.

En el segundo capítulo, se plantean las diferentes fuentes de energías que existen en el mundo (recursos fósiles, energía nuclear y recursos renovables), así como, la utilización final de esta energía en los distintos sectores (industria, transporte, doméstico-servicios, y otros usos no energéticos), tanto en lo referente a España como a nivel mundial. De modo que se logre una base de la situación actual. Además, se describe cuál es la situación de los sistemas de generación de energía eléctrica dentro de esos flujos de energía.

En el tercer capítulo, se describen los sistemas de producción de energía eléctrica. Se presenta una detallada descripción de cada una de las tecnologías de la producción de energía. Además, se exponen los aspectos energéticos y medioambientales de todas estas tecnologías, dando así una visión más completa de la repercusión del uso de cada una de las tecnologías. Finalmente se describen los aspectos económicos de las centrales de cada tipo de energía, lo que genera una visión de la viabilidad económica del uso de cada una de las tecnologías presentadas en el trabajo.

En el cuarto capítulo se presentan los problemas medioambientales que implica la generación de energía eléctrica, además se plantean las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción eléctrica (principalmente dióxido de carbono) y se describen dos de las metodologías con las que se puede calcular esas emisiones. Finalmente se describen otros problemas medioambientales asociados a la producción de energía eléctrica, aparte de los asociados a las emisiones de CO₂.

En el quinto capítulo, a partir de datos públicos de Red Eléctrica Española (REE), se detalla la estructura actual de la producción de energía eléctrica en la España peninsular y cómo ha evolucionado en los últimos 30 años hasta la actualidad. Además, se detallan los conceptos de factor de utilización y de factor de emisión, calculándose los valores de estos factores para la evolución histórica de la generación eléctrica en la España peninsular.

CAPÍTULO 1

En el sexto capítulo, se presentan los objetivos de la UE y de España de cara al futuro, así como los objetivos finales del estudio que se ha realizado, que están relacionados con la generación eléctrica. Además, se realiza el análisis de escenarios futuros respecto a la producción eléctrica en la España peninsular para 2030 y 2050, de modo que se cumplan los objetivos anteriormente fijados

Por último, en el séptimo capítulo, se muestran las conclusiones del trabajo, así como los resultados del análisis de los distintos escenarios y el cumplimiento de los objetivos.

2. Energía eléctrica dentro de los flujos de energía de un país

2.1. Fuentes de energía y utilización final de la energía en el mundo

2.1.1. Fuentes de energía

Se entiende como fuente de energía, una elaboración natural por la cual el hombre puede obtener energía para realizar determinados trabajos u obtener utilidad. Se diferencian dos tipos de fuentes de energías predominantes: las fuentes de energía no renovables y las fuentes de energía renovables. Las fuentes de energía no renovables se encuentran de forma limitada en la naturaleza, por lo tanto, no se renuevan a corto plazo. Actualmente este tipo de fuentes satisfacen la mayoría de la demanda mundial de energía, siendo las más comunes el carbón, el petróleo, el gas natural y el uranio. A pesar de que son tan ampliamente utilizadas, este tipo de recursos están abocados al agotamiento, es por ello por lo que a lo largo de los años e incluso hoy en día se están buscando fuentes de energía inagotables. Las fuentes de energía renovables son aquellas que llegan a nuestro planeta de forma continua y, por lo tanto, son inagotables; las más destacadas son la energía hidráulica, eólica y solar [1].

Hoy en día, el uso de combustibles fósiles está muy extendido a lo largo del mundo, sobre todo, en el uso para climatización y transporte. Esto implica que los niveles de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) sean altos, en los países donde haya un mayor uso de energías no renovables. El hecho de querer reducir las emisiones de CO_2 , junto con el carácter limitado de los recursos fósiles, ha llevado a las energías renovables a un crecimiento exponencial en los últimos años, de modo que, muchos países están invirtiendo en desarrollar este tipo de energías, principalmente en la energía eólica y solar, seguidas de cerca por la energía hidráulica [2].

2.1.2. Energías no renovables

Los combustibles fósiles proceden de la biomasa de seres vivos sepultada en eras pasadas, transformándose, debido al aumento de presiones y temperaturas, en sustancias de alto contenido energético. En este grupo, los más utilizados son: el carbón, el petróleo, el gas natural y sus derivados.

Estos combustibles aportan la mayor parte de la energía hoy en día, y todo apunta a que, en un futuro próximo, esto continuará así.

También hay que destacar el combustible nuclear, el uranio, cuyo isótopo fisible, U-235, supone una importante fuente de energía. Además, el isótopo U-238 es un material fértil que mediante la absorción de neutrones da lugar a plutonio, cuyo isótopo, Pu-239, también es usado como combustible en centrales nucleares de producción eléctrica [1].

2.1.3. Energías renovables

Son fuentes de energía que utilizan recursos de origen no fósil, ni originados de la fisión nuclear. Generalmente el origen de todas las energías alternativas o renovables es el Sol, puesto que provoca numerosos sucesos que son la base de otros tipos de energía. Por ejemplo, provoca la diferencia de presiones en la Tierra que da origen a los vientos para la energía eólica, causa la evaporación del agua que supone la formación de nubes y precipitaciones para la energía hidráulica, y es además aprovechado directamente en la energía solar.

Las principales energías renovables son las siguientes: solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, hidráulica, eólica, incluyéndose también la biomasa (aunque esta emite CO₂, éste ha sido fijado previamente en el combustible).

Este tipo de energías, aunque sean menos dañinas que los combustibles de origen fósil también tienen impactos medioambientales, la mayoría de ellos debidos a las instalaciones o las vías de distribución de la energía eléctrica, así como la utilización de espacios naturales nunca habitados por el hombre.

Ha sido en la década de los noventa cuando este tipo de energías ha tomado una gran importancia, debido a los acuerdos mundiales para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero [1].

2.1.4. Utilización final de la energía

Se va a utilizar el diagrama de Sankey mundial, mostrado en la figura 2.1. para descubrir la utilización final de la energía en el año 2018. Este tipo de diagrama de flujo tiene la característica de que el ancho de las flechas es proporcional al flujo. El diagrama de Sankey es muy útil ya que enfatiza adecuadamente las principales transferencias dentro de un sistema y ayuda a localizar de forma sencilla las contribuciones más importantes a un flujo.

Se ha empleado el diagrama desarrollado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, International Energy Agency) para el año 2018, donde se ven los flujos de energía para todo el mundo. Como descripción general, se puede encontrar la producción y las importaciones (a la izquierda de la figura) y sus respectivos usos de consumo (a la derecha de la figura). A su vez, se ven las principales transformaciones intermedias de esos flujos de energía [3].

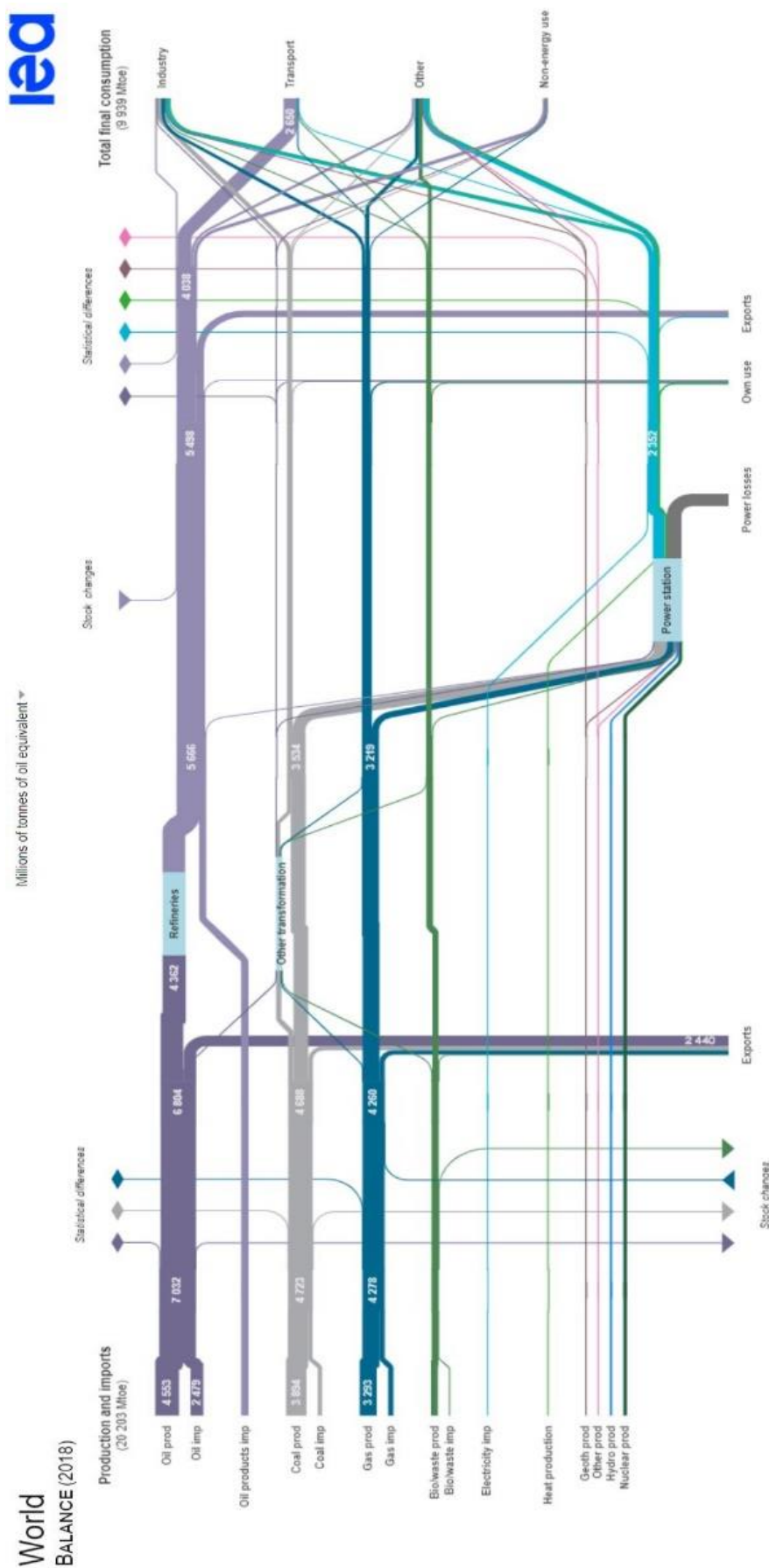


Figura 2.1: Diagrama de Sankey del balance energético mundial del año 2018 [3].

CAPÍTULO 2

De manera simplificada, existen 3 zonas diferenciados en el diagrama de la figura 2.1:

En la parte de la izquierda del diagrama aparecen bajo el título de 'Producción e importaciones' los recursos energéticos utilizados globalmente.

En la parte de la derecha, bajo el título 'Consumo total final' aparece el uso final que se da a la energía en los distintos sectores económicos de la sociedad (industria, transporte, servicios, y uso no-energético)

En la parte intermedia aparecen dos tipos importantes de transformaciones energéticas entre las fuentes de energía y la utilización final de la energía, por un lado, las refinerías para transformar el crudo en derivados del petróleo (esta transformación intermedia no tiene una gran importancia para el estudio que se va a presentar en este trabajo), y por otro lado las centrales de producción de energía eléctrica, que son el objeto principal de estudio en este trabajo.

A continuación, se analizan los valores reflejados en cada una de estas tres zonas del diagrama de la figura 2.1.

1. Producción e importaciones

Se muestran una serie de fuentes de energía junto con la producción de energía; todos estos datos se encuentran englobados en la Tabla 2.1, así como el porcentaje de energía que se produce por cada fuente de energía.

Energía eléctrica dentro de los flujos de energía de un país

Tabla 2.1: Datos de producción de energía mundial en el año 2018 [3].

Fuente	Energía / Mtoe ¹	Porcentaje de Energía / %
Crudo	8429	41,72
Carbón	4723	23,38
Gas Natural	4278	21,18
Residuos bio.	1353	6,70
Electricidad	63	0,31
Calor	2	0,01
Geotérmica	92	0,46
Otros ²	194	0,96
Hidráulica	362	1,79
Nuclear	707	3,50
TOTAL	20203	

¹ Una megatonelada equivalente de petróleo, Mtoe, indica la cantidad de energía liberada al quemar una megatonelada de petróleo crudo. (1 toe = 41.87 GJ)

² Incluye la energía solar, la energía eólica y la energía mareomotriz.

Como se puede ver, pese a que se ha reducido el porcentaje de petróleo crudo desde los años noventa, en la actualidad sigue siendo la mayor fuente de energía mundial, muy por encima de las demás. No obstante, hay que destacar el hecho de que cada vez más se estén igualando los porcentajes de carbón y gas natural. Esto se debe mayormente a la reducción de las plantas de combustión de carbón por sus altas emisiones de CO₂.

Asimismo, destaca el bajo porcentaje de las energías renovables (solar, eólica, mareomotriz e Hidráulica), a pesar de la importancia actual de estas energías. Esto se debe a que países como Estados Unidos, China o Rusia tienen un enorme uso del carbón en su estructura energética.

2. Consumo final

Tal y como se deduce del diagrama de Sankey de la figura 2.1, los usos finales de la energía producida son: el sector de la industria, el sector del transporte, otros sectores y usos no energéticos.

A continuación, se muestran una serie de gráficas donde se puede ver la implicación de cada fuente de energía en función del sector en el que se utilice.

2.1. Sector Industrial

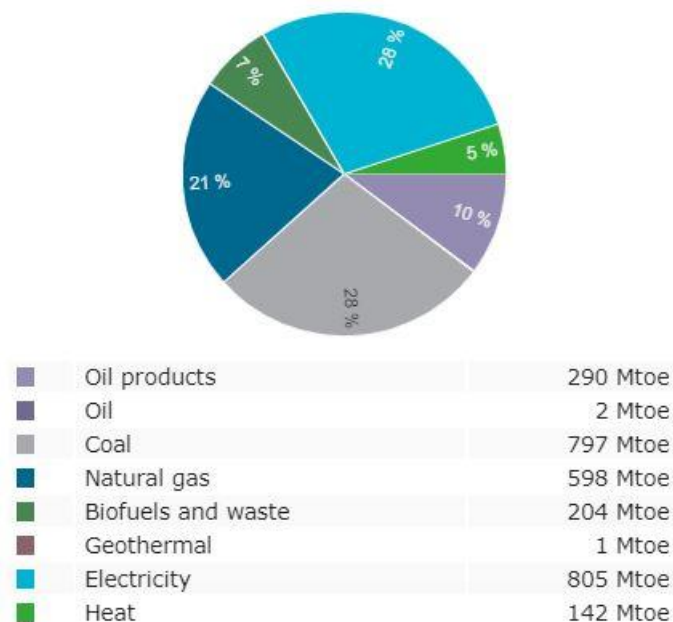


Figura 2.1: Distribución del consumo final de energía en el sector industrial a nivel mundial en el año 2018 [3].

Como se observa en la figura 2.2, el sector industrial utiliza todo tipo de fuentes de energías. Por encima de todas destacan la electricidad, base para cualquier producción industrial, y el carbón. Este sector abarca un amplio espectro de producciones industriales, lo que justifica el uso de tantas fuentes de energía.

2.2. Sector Transporte

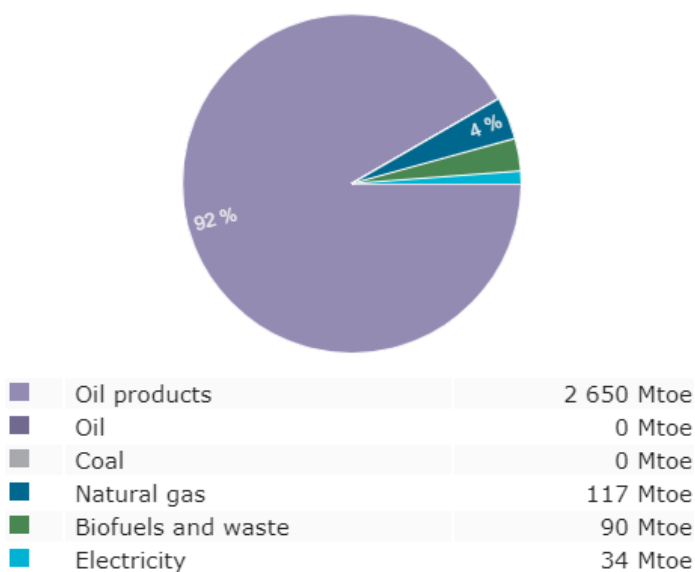


Figura 2.2: Distribución del consumo final de energía en el sector del transporte a nivel mundial en el año 2018 [3].

Energía eléctrica dentro de los flujos de energía de un país

En este sector es bien sabido desde hace décadas que la principal fuente de energía son los derivados del petróleo, tal y como se refleja la figura 2.3. Sin embargo, actualmente va cobrando algo de importancia el gas natural, tanto en su forma licuada (GNL) como en su forma comprimida (GNC), puesto que es algo más eficiente y sostenible medioambientalmente; actualmente el uso de este combustible está extendido sobre todo en autobuses urbanos, camiones de recogida de residuos sólidos urbanos... [4].

También es destacable la inclusión de la electricidad en este sector, para usos en gasoductos u oleoductos con bombas movidas por motores eléctrico y para el transporte por ferrocarril.

2.3. Otros sectores

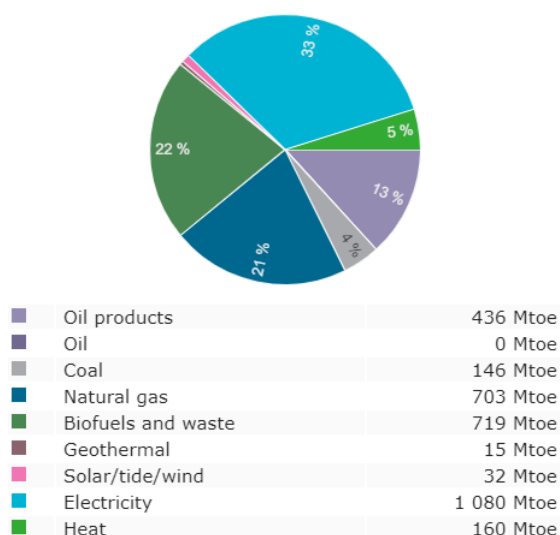


Figura 2.3: Distribución del consumo final de energía en otros sectores a nivel mundial en el 2018 [3].

Este grupo engloba una serie de usos generales, como usos residenciales, comerciales, servicios públicos, agricultura, pesca, entre otros.

La figura 2.4 muestra el reparto de la energía en este sector. Al igual que en el industrial, tiene una gran importancia la electricidad para cualquier consumo que se lleve a cabo. Cabe destacar la importancia a nivel mundial de los biocombustibles y la biomasa en este sector, esto se debe principalmente al uso de madera para usos residenciales, como calentarse o cocinar en países como África y Asia.

2.4. Usos no energéticos

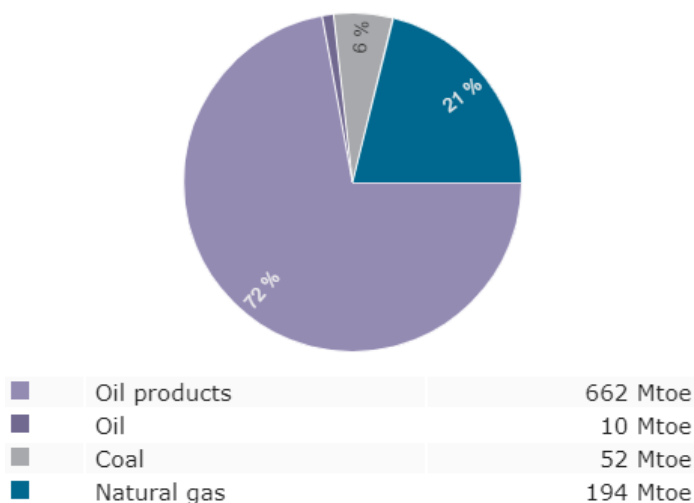


Figura 2.4: Distribución del consumo final de energía en usos no energéticos a nivel mundial en el 2018 [3].

La IEA trata como usos no energéticos productos petrolíferos como las ceras de parafina, lubricantes o betún, como se muestra en la figura 2.5. También hay que destacar que el coque de petróleo se incluye en esta sección siempre y cuando no se especifique lo contrario [5].

3. Transformaciones intermedias

En la parte central del diagrama de Sankey de la figura 2.1 se encuentran las transformaciones intermedias en las que se utilizan las distintas fuentes de energía iniciales. El producto final de estas transformaciones es el que se utiliza en el consumo final.

Se observa que existen dos transformaciones importantes, y otras menos relevante que se engloban en la sección “Otras transformaciones”. La primera de ellas son las refinerías, instalaciones en las que se obtienen productos útiles a partir del petróleo crudo mediante el proceso de refinado [6]. Es por esto por lo que este tipo de transformaciones es fundamental para el uso final de las fuentes de energía, más específicamente el petróleo crudo.

La otra transformación clave son las centrales eléctricas, donde se transforma la energía de las distintas fuentes de energía primaria y se obtiene energía eléctrica, que forma parte del consumo final. Al contrario que las refinerías este tipo de instalaciones pueden utilizar energía de muchas fuentes, por ejemplo, en centrales térmicas donde se utiliza carbón, centrales hidroeléctricas donde se usa energía hidráulica...

Este último tipo de transformación será el eje central del trabajo, por lo que, en apartados posteriores se hablará y se tratarán datos exclusivamente de la generación de electricidad; además se tendrá en cuenta que a medida

que se fomente la electricidad en otros sectores, la energía de la generación de electricidad aumentará.

2.2. Fuentes de energía y utilización final de la energía en España

Al igual que en el apartado anterior se ha utilizado el diagrama de Sankey específico para España para 2018, puesto que es el año más reciente en el que se tienen datos en la IEA; este se muestra en la figura 2.6.

A partir del diagrama se van a explicar las fuentes de energía en España dando una idea de cuál es más importante y la utilización final de la energía en cada uno de los sectores, de modo que proporcionará una contextualización del estado de la energía en España.

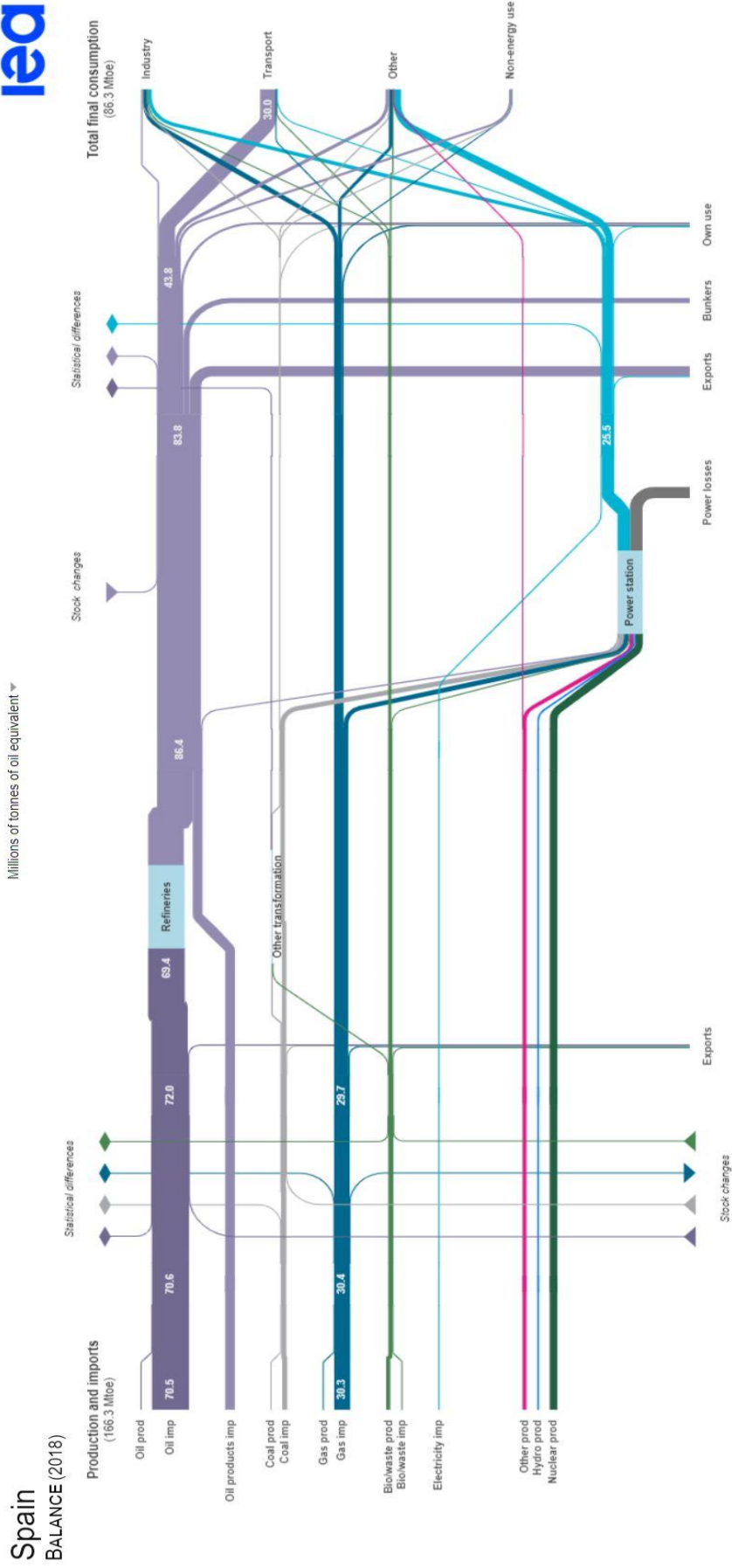


Figura 2.6: Diagrama de Sankey del balance energético en España del año 2018 [3].

2.2.1. Fuentes de energía en España

En base a la figura 2.6 se pueden distinguir claramente las fuentes de energía primaria, la producción local de estas y las importaciones que necesita el país. Para el caso específico de España, destaca, que la mayor parte de las principales fuentes de energía utilizadas provienen de importaciones, esto se debe a que España consume mucho más de lo que produce y necesita importar energía.

A continuación, en la Tabla 2.2 se muestran los datos del diagrama de Sankey agrupados en cada tipo de fuente, proporcionando una idea global de la importancia de todas las fuentes.

Tabla 2.2: Datos de producción e importación de energía en la España peninsular del año 2018 [3].

Fuente	Energía / Mtoe ¹	Porcentaje de energía / %
Crudo	89,0	53,52
Carbón	10,2	6,13
Gas Natural	30,4	18,28
Residuos bio.	9,8	5,89
Electricidad	2,1	1,26
Otros ²	7,3	4,39
Hidráulica	3,0	1,80
Nuclear	14,5	8,72
TOTAL	166,3	

¹ Una megatonelada equivalente de petróleo, Mtoe, indica la cantidad de energía liberada al quemar una megatonelada de petróleo crudo. (1 toe = 41.87 GJ)

² Incluye la energía solar, la energía eólica y la energía mareomotriz.

De esta tabla se pueden inferir muchos detalles, sobre todo conociendo los porcentajes mundiales de los tipos de energías. Lo que puede dar una idea de las emisiones del país, y de cómo se comporta de cara al cumplimiento de las normativas establecidas por la UE. Respecto a los porcentajes más altos destaca una gran dependencia del crudo, puesto que, es mucho mayor que la media mundial representada en la Tabla 2.1. Asimismo, destaca la diferencia entre el carbón y el gas natural; cobrando cada vez más importancia el gas natural, debido a la descarbonización producida en España. Pese a no estar expresado en el diagrama, en el 2020 se han cerrado la mayoría de centrales térmicas de carbón, quedando únicamente tres (las de Aboño y Soto de la Ribera, en Asturias, y la de Los Barrios, en Cádiz) que se cerrarán en 2021 [7].

CAPÍTULO 2

También se debe destacar, por parte de España, el relativamente gran porcentaje de energía proveniente de energías renovables (Eólica, solar, maremotriz e Hidráulica) junto con residuos biodegradables. Esto implica una cantidad menor de emisiones, así como un crecimiento de las energías renovables, donde España es un país referente [3].

2.2.2. Utilización final de la energía en España

Se va a proceder de la misma forma que en el apartado 2.1.4, exponiendo gráficos para cada uno de los sectores, de modo que dé una idea de la procedencia de la energía destinada a cada uno de ellos.

1. Sector industrial

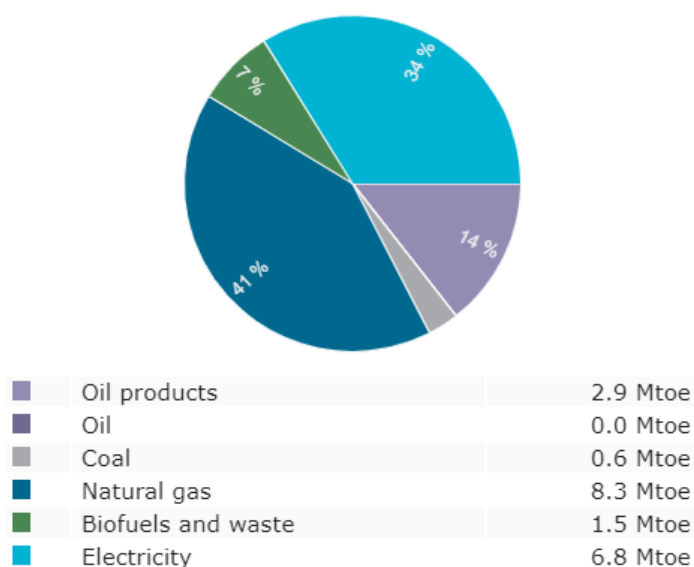


Figura 2.5: Distribución del consumo final de energía en el sector industrial en la España peninsular en el 2018 [3].

La figura 2.7 representa claramente el uso de las fuentes de energía en la industria española. Es característico el empleo de gas natural en este sector con respecto al nivel mundial. Esto se debe, al igual que en la producción e importaciones de fuentes, a la descarbonización en España, ya que se ha recortado energía procedente del carbón y se ha implementado energía procedente del gas natural.

También mencionar el consumo de electricidad, que es un elemento básico en la industria, y el uso de derivados de petróleo una vez ya refinados; tienen cabida en el sector industrial porque se emplean en numerosos procesos de producción.

2. Sector transporte

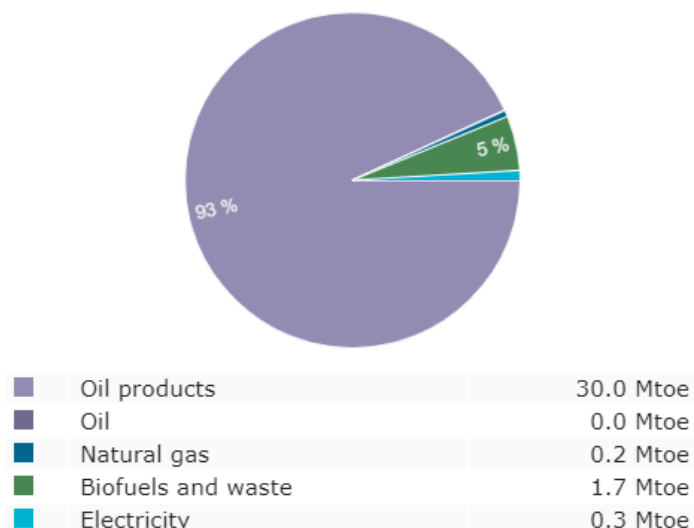


Figura 2.6: Distribución del consumo final de energía en el sector del transporte en la España peninsular en el 2018 [3].

Tal y como se muestra en la figura 2.8 el sector del transporte en España está totalmente dominado por los derivados del petróleo, normalmente por la gasolina. Por otra parte, un 5 % del total son biocombustibles como el biogás, biodiesel, syngas...

3. Otros sectores y usos no energéticos

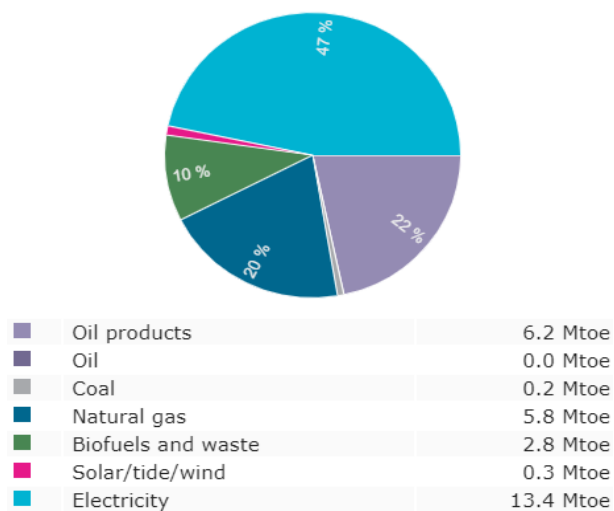


Figura 2.7: Distribución del consumo final de energía en otros sectores en la España peninsular en el 2018 [3].

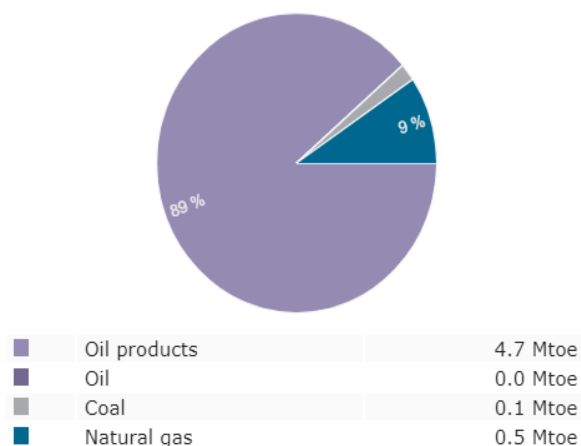


Figura 2.8: Distribución del consumo final de energía en usos no energéticos en España en el 2018 [3].

Basándose en la figura 2.4 y la 2.9 se puede concluir que España aplica un mayor porcentaje de energía proveniente de la electricidad en ‘Otros sectores’, lo cual es beneficioso desde el punto de vista medioambiental, sin embargo, también cuenta con un mayor uso de derivados del petróleo.

Comparando las figuras 2.5 y 2.10 se comprueba que no existe mucha diferencia en este sector, ya que tiene en cuenta usos centrados en los derivados de petróleo y, por lo tanto, está controlado por esta fuente.

2.2.3. Transformaciones intermedias en España

A continuación, se va a comparar la generación eléctrica por parte de España en la figura 2.11. respecto al mundo en la figura 2.12.

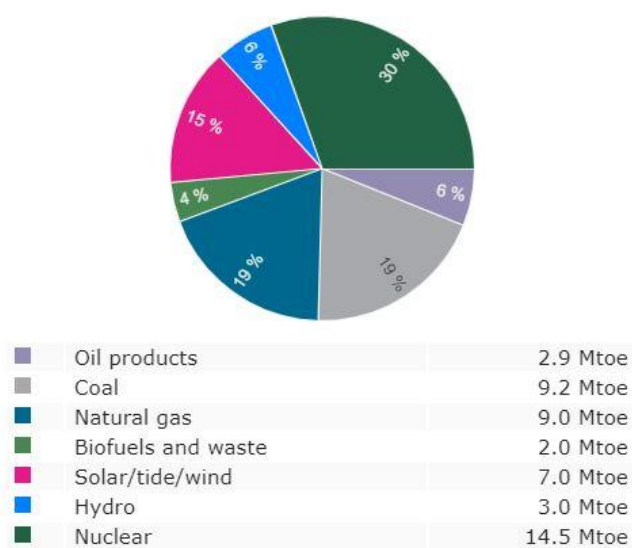


Figura 2.9: Distribución de la generación de energía eléctrica en la España peninsular en el 2018 [3].

Energía eléctrica dentro de los flujos de energía de un país

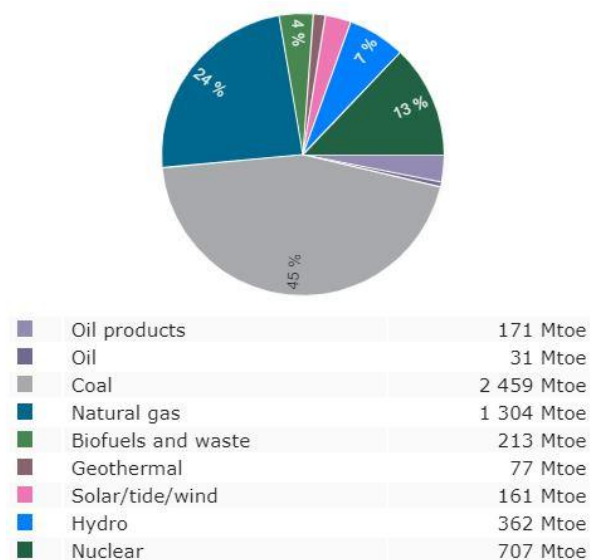


Figura 2.10: Distribución de la generación de energía eléctrica en la España peninsular en el 2018 [3].

Claramente se observa que la energía nuclear tiene un mayor peso relativo en España respecto del mundo, incluso llega a ser del doble, también destaca la gran presencia de energías renovables en España, siendo del 15 %, mientras que a nivel mundial corresponde a menos del 4 % de la generación eléctrica. Esto tiene un efecto evidente en la generación de electricidad a partir del carbón, puesto que tiene mucho menor peso relativo en España.

Este tipo de distribución hace que España sea uno de los países que hayan reducido sus emisiones contaminantes a partir de la generación eléctrica, debido a que las energías renovables y la nuclear tienen unas emisiones inapreciables en comparación con el carbón.

3. Sistemas de producción de energía eléctrica

Tal y como se ha mencionado en el capítulo anterior, el presente TFG se centrará en el estudio del impacto medioambiental de la generación de energía eléctrica, por ello, se va a describir inicialmente cuales son las tecnologías más habituales de generación de energía eléctrica a nivel mundial. En este capítulo se va a explicar los diferentes flujos que entran a la parte de generación de energía en el diagrama de Sankey (figura 2.1 y figura 2.6). De modo que se definirá la tecnología, la función de esta y sus emisiones asociadas.

Hay que destacar que en este trabajo para ser más rigurosos se ha tenido en cuenta que las energías renovables también tienen un impacto ambiental si se considera todo su ciclo de vida útil, desde la construcción de la instalación hasta su desmantelamiento. Por lo tanto, se darán unas nociones sobre esas emisiones para todas las tecnologías de producción, incluidas cada una de las energías renovables.

3.1. Energía hidráulica

Ya en la antigüedad se utilizaban las corrientes de los ríos para mover grandes molinos. El perfeccionamiento de estos molinos dio como resultado las centrales hidráulicas construidas en presas o embalses, donde, actualmente la energía hidráulica genera más electricidad que cualquier otro recurso renovable. De esta forma, una presa bloquea el río con un muro de hormigón, inundando así la zona cercada y creando un lago artificial, con el fin de regular el caudal en función de la época del año [8].

Una central hidroeléctrica puede definirse como una instalación en la que se consigue aprovechar la energía de una masa de agua a una cierta altura, transformándola en energía eléctrica. Esto se logra utilizando un salto de agua considerable para mover una turbina hidráulica, tal y como el esquema representativo muestra a continuación en la figura 3.1 [9].

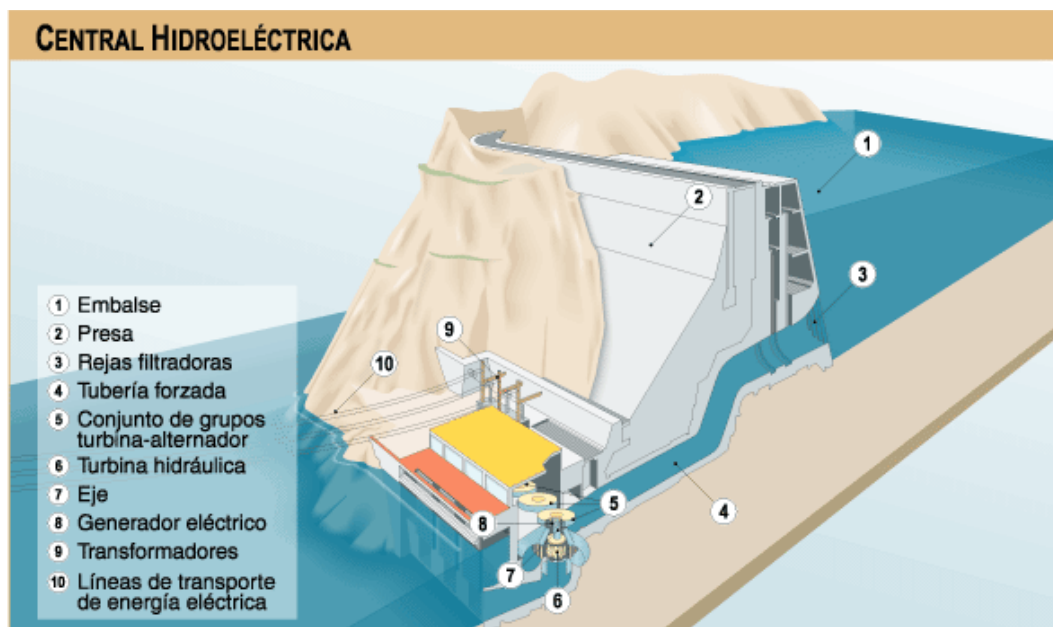


Figura 3.1: Esquema de una central hidráulica [10].

El funcionamiento de una central hidroeléctrica ocurre cuando parte del agua que está almacenada es filtrada y cae por unas tuberías haciendo girar las hélices de la turbina engranada con un generador de energía, de modo que, ese movimiento de las hélices se transforma en energía eléctrica por medio del generador. Posteriormente esa energía será transportada hasta una subestación eléctrica y de ahí a la red eléctrica.

Existen varios tipos de centrales hidráulicas, las más importantes se exponen seguidamente:

3.1.1. Hidráulica convencional

Este tipo es el más conocido, son centrales con un embalse que almacena agua con capacidad adecuada para permitir una regulación del caudal superior a un día. Por ello, son importantes en los momentos de máxima demanda.

Generalmente, los embalses de los que se toma el agua tienen otras funciones prioritarias a la de generación de energía, tales como el suministro de agua potable, agua de riego, la regulación del caudal del cauce para evitar inundaciones o con fines industriales [11].

Este tipo de tecnología tiene una serie de emisiones, considerando el ciclo de vida completo de la energía hidráulica. Se identifican tres fuentes principales de emisiones de efecto invernadero (GEI): las asociadas a la construcción de la central; las procedentes de la inundación de terrenos con vegetación y las asociadas a la energía térmica de apoyo, en algunos casos [12].

3.1.2. Hidráulica de bombeo puro

Es un tipo específico de central que cuenta con dos embalses, tal y como se puede ver en la figura 3.2, uno aguas arriba de la central y otro aguas abajo. Además de las turbinas también dispone de al menos una bomba o grupos de turbinas reversibles. Su cometido varía en función de la demanda de energía: en momentos de alta demanda funciona como dos centrales turbinando agua; sin embargo, en momentos de baja demanda, se bombea agua del embalse inferior al embalse superior (siempre que el nivel del embalse superior lo permita) cerciorándose de poder turbinar cuando la demanda de energía lo requiera.

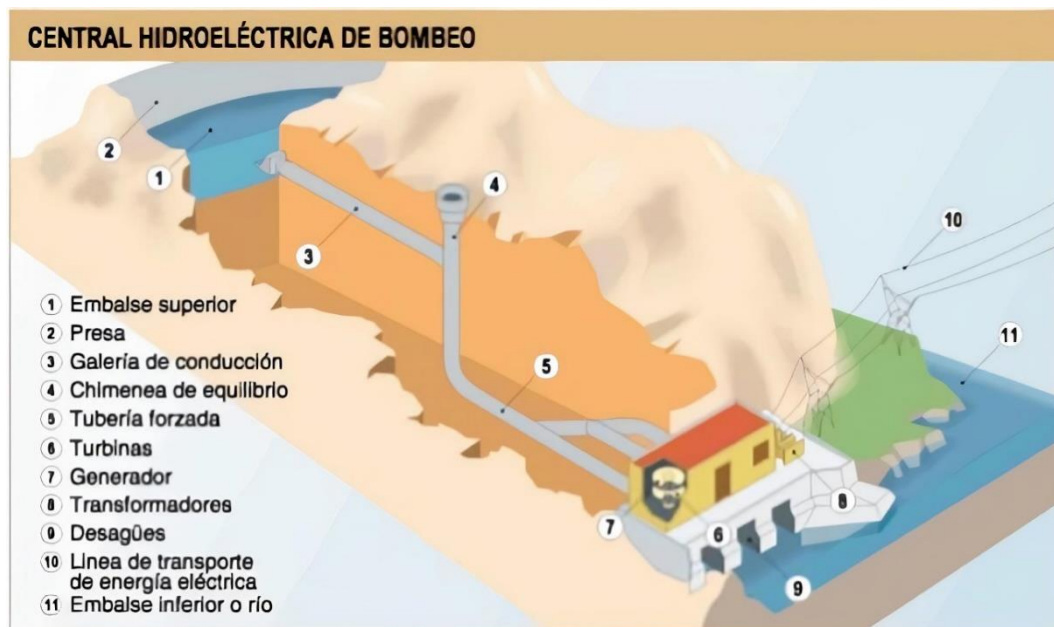


Figura 3.2: Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo [10].

3.1.3. Hidráulica mixta

Es un tipo medio entre una convencional y una de bombeo. Dispone de un pequeño embalse de captación, pero normalmente no tienen capacidad de regulación, y en caso de tenerla, no supera un día; por lo tanto, cuando hay excedentes actuará como una central convencional. Generalmente, este tipo de centrales se ubica en zonas montañosas, en las que el embalse capta el agua de las lluvias o del deshielo.

3.2. Energía nuclear

La energía nuclear es una de las tecnologías de producción de energía eléctrica más importantes. Se basa en la división de átomos en un reactor nuclear, proceso denominado como fisión, donde un par de neutrones son

CAPÍTULO 3

absorbidos por cada núcleo atómico de material combustible fisible, el cual se fisiona en dos núcleos más pequeños y algunos neutrones adicionales. Algunos de los neutrones liberados colisionan con otros núcleos atómicos, provocando así una reacción en cadena donde se libera energía, la cual se extrae del reactor al calentar un fluido circulante, generalmente agua. Este calor se utiliza para generar vapor que impulsa las turbinas, produciendo electricidad (5 y 6 en la figura 3.3).

La energía nuclear ayuda a conseguir una estabilidad en el abastecimiento energético, puesto que los reactores nucleares son capaces de funcionar ininterrumpidamente durante periodos muy largos en el tiempo, excepto en periodos de parada o recarga de combustible [13].

A continuación, en la figura 3.3 se presenta el esquema de una central nuclear.

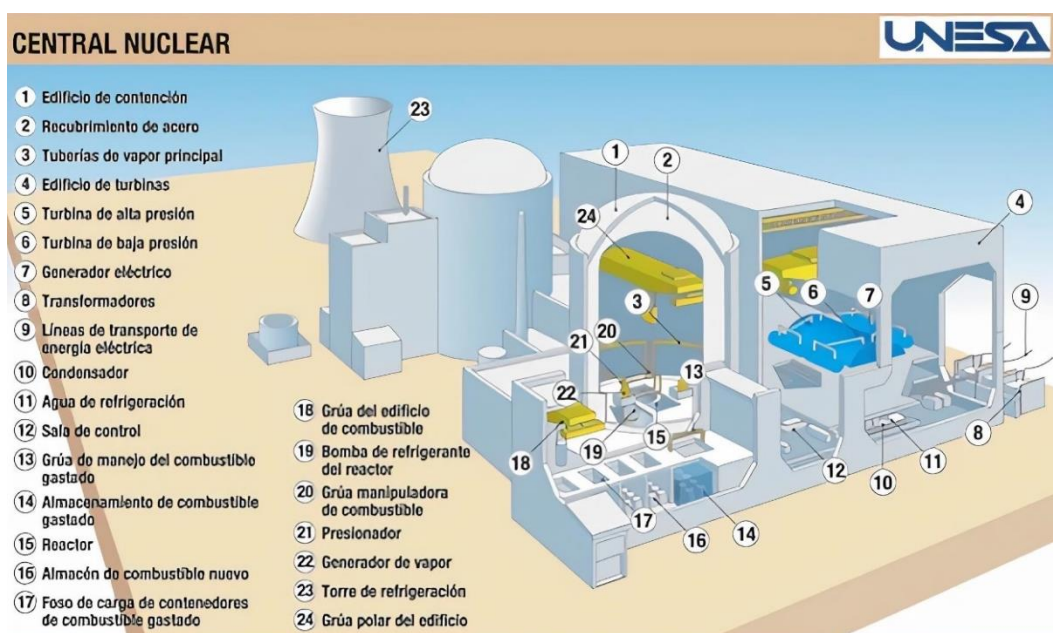


Figura 3.3: Esquema de una central nuclear [10].

3.2.1. Combustible

El combustible más habitual en la alimentación de un reactor nuclear es el uranio, en su estado natural es una mezcla de tres isótopos: U-234 (0,02 %), U-235 (0,7 %) y U-238 (99,28 %). Sin embargo, el único isótopo fisiónable es el U-235. Por lo tanto, para que se produzca la fisión es necesario una mayor concentración del isótopo fisiónable, además de una reacción en cadena. Es por ello por lo que el Uranio en estado natural debe ser enriquecido en su isótopo fisiónable, generalmente entre un (2 a 5) % de U-235 en el caso de un reactor nuclear de agua.

El enriquecimiento se consigue por lo general, utilizando difusión gaseosa o centrifugado de gas. Posteriormente al enriquecimiento, el uranio se convierte en polvo y es compactado en pastillas cilíndricas [14].

3.2.2. Responsabilidad medioambiental

La energía nuclear es una fuente libre de CO₂ durante el funcionamiento de una central nuclear y, durante su ciclo de vida, la energía nuclear produce aproximadamente la misma cantidad de emisiones de CO₂ por unidad de electricidad que la energía eólica, y un tercio de las emisiones por unidad de electricidad con respecto a la energía solar. Además, es una pieza fundamental para lograr la descarbonización y mantener el aumento de las temperaturas mundiales por debajo de 1.5 °C [15].

Según el informe de la IEA, *“sin una contribución importante de la energía nuclear, la transición energética mundial será mucho más difícil. Junto con las energías renovables, la eficiencia energética y otras tecnologías innovadoras, la energía nuclear puede hacer una contribución significativa para lograr los objetivos de sostenibilidad y mejorar la seguridad energética”* [16]. Ejemplo de ello es Francia, donde el 70 % de su electricidad es generada a partir de energía nuclear, siendo las emisiones en su sector eléctrico una sexta parte de la media europea.

A pesar de todo, se puede considerar que esta tecnología tiene algunas emisiones atendiendo al análisis del ciclo de vida (LCA, life-cycle assesment). Este análisis incluye los efectos de la minería, la preparación del combustible, la construcción de la planta, el transporte, el desmantelamiento y la gestión de residuos [17].

Finalmente, cabe destacar que el principal problema de esta tecnología son los problemas que ocasionan a largo plazo los residuos radiactivos y los usos no energéticos, como en la fabricación de armas. Este hecho, da lugar a una mala aceptación pública, también debida a los desastres nucleares como el de 2011 en Fukushima (Japón), o el de Chernóbil (Ucrania), en los años 80 [18].

3.3. Carbón (Fuel + Gas)

El tipo de centrales que generan energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, como gas natural, carbón o fueloil (Fuel + Gas) mediante un ciclo termodinámico de agua – vapor (ciclo Rankine con sobrecalentamiento y recalentamiento) reciben el nombre de centrales térmicas convencionales, para diferenciarlas de otras centrales térmicas, como las de ciclo combinado o las nucleares.

CAPÍTULO 3

Con ayuda de la figura 3.4, se explicará el funcionamiento de estas centrales. Previamente triturado (1, 2 y 3 en la figura 3.4), el carbón se quema, generando enormes cantidades de calor para transformar el agua en vapor y siendo ese vapor el que mueve los álabes de las turbinas. El giro se transmite al generador, donde se produce energía eléctrica a partir de la energía mecánica. Finalmente, el vapor que sale de la turbina se dirige a un condensador (16 en la figura 3.4) donde se convertirá en fase líquida para comenzar de nuevo el proceso de producción de vapor [19].

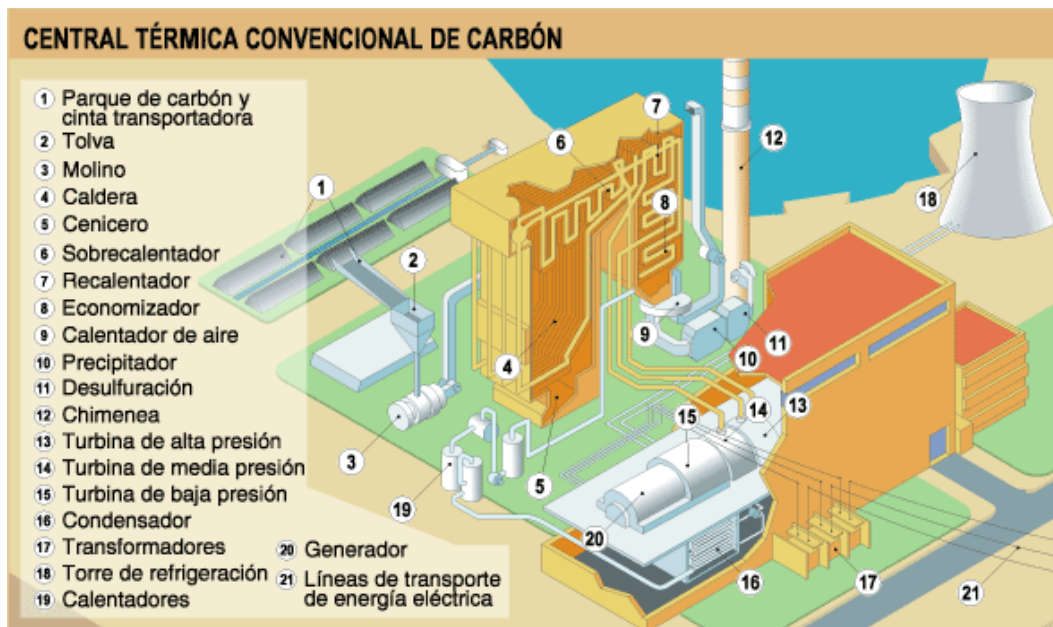


Figura 3.4: Esquema de una central térmica convencional [10].

3.3.1. Aspectos medioambientales

Uno de los grandes inconvenientes de este tipo de tecnología está en el aspecto medioambiental ya que resulta especialmente dañina. Es por ello, por lo que numerosos países han optado por cerrar casi por completo este tipo de centrales.

Desechos producidos

La mayor parte de la gente ve como factor más perjudicial la liberación de gases contaminantes y el calentamiento global derivados de la producción de energía a partir de carbón. Sin embargo, existen tres principales desechos que resultan de la combustión de carbón que también son altamente perjudiciales para el medioambiente:

- Cenizas volantes: son aquellas que se quedan suspendidas en el aire después de la combustión, pudiendo producir la llamada lluvia ácida. Este desecho se logra reducir en gran medida con el uso de depuradores electrostáticos (11 en la figura 3.4).

- Cenizas de fondo: como su nombre indica resultan de la combustión del carbón y se depositan en el fondo de las calderas. Este tipo de cenizas puede ser reutilizado con un sistema de extracción húmeda de cenizas (5 en la figura 3.4), pudiendo usarse como material en el sector de la construcción.
- Yeso resultante del proceso de retención de óxido de azufre en los gases: puesto que el azufre debe ser retenido por ser contaminante, tóxico e irritante, resultan grandes toneladas de yeso (10 en la figura 3.4).

Con la finalidad de no ignorar estos desechos se ha introducido el concepto de “carbón limpio”, donde las centrales aplican tecnologías capaces de reutilizar estos productos impidiendo que lleguen a la naturaleza [20].

Emisiones contaminantes

La producción de energía a partir de carbón es una de las tecnologías que más emisiones contaminantes libera, de ahí la importancia de reducir en gran medida el uso de combustibles fósiles. Se espera que para 2040, el petróleo, el carbón y el gas natural, supongan únicamente una cuarta parte del consumo de energía primaria.

Es por eso por lo que países como España han cerrado completamente la mayoría de sus centrales térmicas de carbón. El pasado 2020 terminó con el cierre de 15 centrales térmicas más en España, lo que supuso acabar con cerca del 60 % de toda la capacidad de generación eléctrica con carbón. Hoy en día, únicamente quedan dos centrales en la Península y otra en Mallorca, pero se prevé que se cierren en los próximos años [21].

Este tipo de actuación tiene un gran efecto beneficioso para el medioambiente, pero tiene un contrapunto, debido a la dependencia de ciertas regiones de esas centrales.

3.4. Ciclo combinado

Las centrales termoeléctricas de ciclo combinado, que generalmente utilizan gas natural, tienen un funcionamiento parecido a las centrales térmicas convencionales. Sin embargo, las de ciclo combinado utilizan dos máquinas térmicas basadas en dos ciclos termodinámicos, el correspondiente a una turbina de gas (ciclo de Brayton) y el correspondiente a una turbina de vapor (ciclo de Rankine), tal y como puede apreciarse en la figura 3.5 [22].

El calor de los gases de escape de la turbina de gas se emplea como fuente de energía para el funcionamiento de la turbina de vapor. De este modo

CAPÍTULO 3

se incrementa el rendimiento del proceso, convirtiendo un mayor porcentaje de combustible en energía eléctrica.

El alto rendimiento de los ciclos combinados de gas natural y las bajas emisiones de gases contaminantes producidas convierten este tipo de tecnología en la energía térmica de origen fósil más limpia [23].

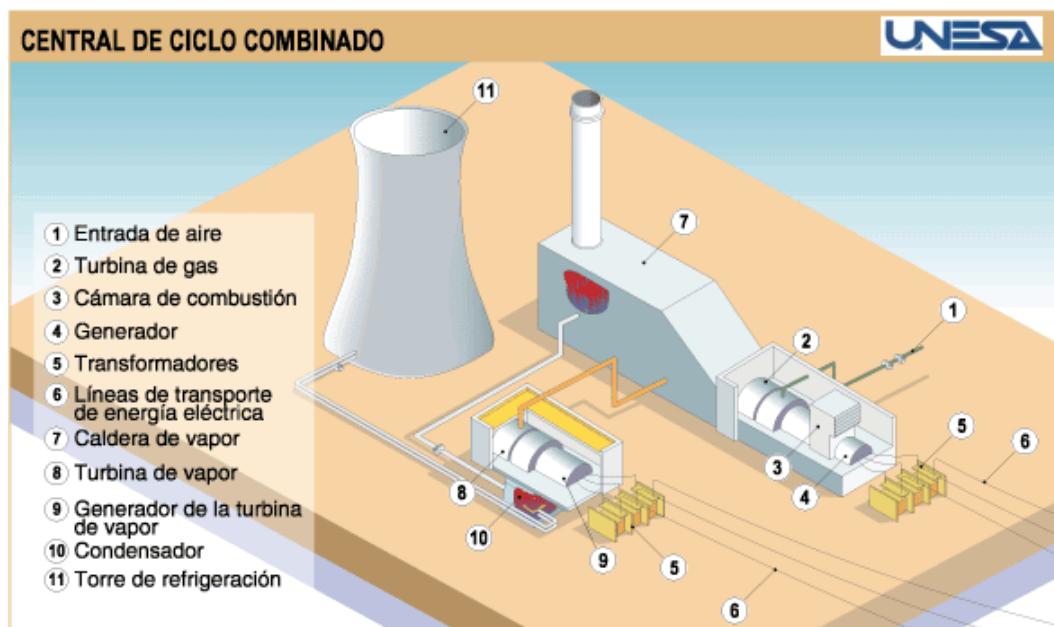


Figura 3.5: Esquema de una central de ciclo combinado [10].

En los últimos años ha habido una incorporación masiva de energía procedente de fuentes renovables a las redes, lo que añade un factor de impredecibilidad y aleatoriedad en cuanto al suministro de energía eléctrica. Por ello, existe la necesidad de una capacidad de generación de respaldo más flexible y que pueda mitigar las fluctuaciones de la generación eléctrica.

Existen varios mecanismos para dar flexibilidad al suministro eléctrico, siendo entre otros, las interconexiones, las centrales de bombeo, y los ciclos combinados. En el caso de estos últimos, además de la gran flexibilidad que pueden aportar, generan bajas emisiones contaminantes al usar gas natural. Además, el gas que se utiliza como materia prima en estas centrales ha visto reducido su precio. Todos estos hechos, sitúan a los ciclos combinados como pieza clave para dar la estabilidad al sistema eléctrico [24].

3.4.1. Aspectos medioambientales

Como ocurre con todas las tecnologías, el ciclo combinado también tiene efectos adversos para el medioambiente: eleva la temperatura del agua para disponer de agua de refrigeración, emite gases contaminantes en la construcción de gaseoductos para el suministro del gas natural, y como combustible fósil, emite CO₂. Sin embargo, este tipo de efectos adversos están

limitados de acuerdo con las normativas de cada país y con los compromisos internacionales que estos adquieren [25].

De la misma forma que tiene efectos adversos, tiene beneficios medioambientales considerables:

- El rendimiento en este tipo de centrales es muy superior al de otras centrales térmicas convencionales, es decir, se necesita consumir menos energía para producir energía eléctrica.
- Produce menor contaminación atmosférica en comparación con cualquier otro combustible fósil.
- Únicamente requiere agua para la condensación del vapor en el ciclo Rankine, por lo tanto, requiere menor cantidad de agua de refrigeración.
- El transporte y suministro del gas natural se hace a través de gasoductos subterráneos, lo que evita el impacto derivado de la circulación de vehículos [23].

Todos estos beneficios hicieron que el ritmo de instalación de estas centrales se disparara desde sus comienzos en 2002, lo que ha producido el bajo porcentaje de utilización de esta tecnología, lo cual se explicará en detalle más adelante.

3.5. Energía eólica

La energía eólica es una de las tecnologías renovables que mayor crecimiento ha experimentado en los últimos años a nivel mundial, en parte debido a la disminución de los costes de los equipos y al aumento de su potencia y rendimiento. Esto ha hecho que la capacidad instalada de generación eólica mundial se haya multiplicado por casi 75 en las últimas dos décadas [26].

Un claro ejemplo del auge de esta tecnología es España, país que pasó de tener 2 206 MW de capacidad instalada en el año 2000 a 25 553 MW en el año 2019, siendo la mayor parte de ella eólica terrestre al tener solo 5 MW de eólica marina. En 2018, la energía eólica supuso un 48.5 % de la potencia renovable instalada en España [27]. Cabe destacar que España fue el segundo país europeo que más potencia instaló en el 2019, sólo superado por Reino Unido. Tal y como se muestra en la figura 3.6 se instalaron 2.3 GW de energía eólica.

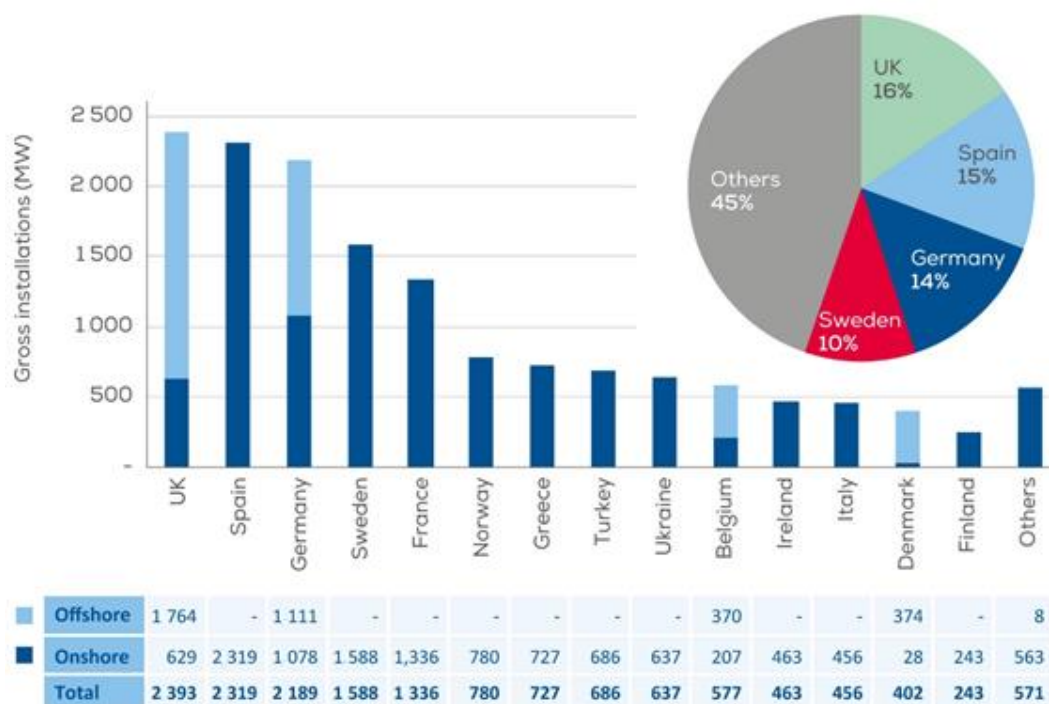


Figura 3.6: Potencia instalada a nivel europeo en el 2019 [28].

La energía eólica está basada en el aprovechamiento de la energía cinética que posee una masa de aire. Para ello, se utilizan aerogeneradores, que convierten la fuerza del viento en electricidad. Estos equipos pueden constar de palas rotando alrededor de un eje horizontal o utilizar palas verticales en torno a un cilindro girando a lo largo de un eje vertical. El más empleado es el aerogenerador de eje horizontal [29].

Este tipo de aerogenerador consta de un rotor, dotado normalmente de tres palas con diseño aerodinámico, conectadas por el buje, que captan la energía del viento y transmiten su potencia a través del eje de baja velocidad. Posteriormente, en la caja multiplicadora, un sistema de engranajes hace que el eje secundario gire mucho más rápido que el eje principal, movimiento que se transmite al generador, donde se convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Los elementos citados se sitúan sobre una góndola soportados, a su vez, por una torre. La veleta y el anemómetro indican al aerogenerador la fuerza y la dirección del viento.

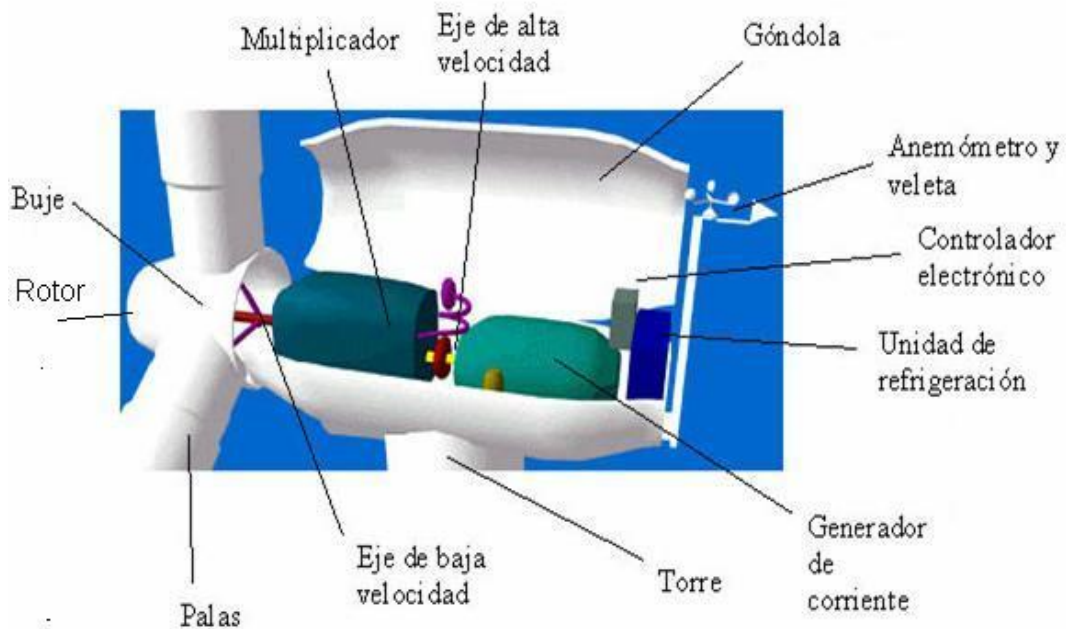


Figura 3.7: Esquema de aerogenerador de eje horizontal [30].

La cantidad de energía que se puede conseguir del viento depende del tamaño de la turbina y de la longitud de sus palas. Más concretamente la producción es directamente proporcional a la dimensión del rotor y a la tercera potencia de la velocidad del viento [26].

Los aerogeneradores generalmente se disponen perpendiculares a la dirección del viento predominante y en filas separados entre ellos tres veces el diámetro del rotor, para evitar que las posibles turbulencias afecten al resto de aerogeneradores [31].

3.5.1. Tipos de energía eólica

Los generadores se pueden situar tanto en la tierra como en el mar, dando así dos tipos de energías eólicas: la energía eólica terrestre (también denominada onshore) y la tecnología eólica marina (también denominada offshore).

3.5.1.1. Energía eólica terrestre (Onshore)

Este tipo de parques eólicos se instalan en áreas rurales despobladas, y lugares aislados de núcleos urbanos. La elección del emplazamiento correcto es clave puesto que hay que considerar una serie de cuestiones que determinan la viabilidad de estos generadores:

- El potencial energético de la zona junto con la variabilidad del viento a lo largo del año.

CAPÍTULO 3

- El impacto ambiental debido a las condiciones geológicas del parque, que pueden generar un importante impacto a la hora de su construcción.
- Accesibilidad al lugar, ya que es importante en caso de avería que un técnico pueda desplazarse de forma sencilla hasta los aerogeneradores.

Sin embargo, cuenta con numerosas ventajas, relacionadas con la producción de una energía limpia y renovable, que apenas genera residuos y con costes de mantenimiento muy bajos. Además, estas instalaciones no interrumpen las actividades agrícolas de los alrededores y una vez desmantelado el parque, puede volverse a utilizar el terreno [32].

3.5.1.2. Energía eólica marina (Offshore)

La energía eólica marina está en continuo aumento, sólo entre 2007 y 2017 la potencia de las turbinas en alta mar aumentó un 102 %. Sin embargo, no en cualquier sitio se pueden instalar este tipo de parques eólicos.

En la actualidad, los parques son ubicados en aguas no muy profundas y alejados de la costa, de las rutas de tráfico marino y de espacios de interés ecológico. El principal país con mayor capacidad instalada en Europa es Reino Unido con un 44 % de las instalaciones eólicas marinas de toda Europa.

Existen una serie de ventajas de la eólica marina respecto a la terrestre. Al igual que la terrestre es limpia e inagotables, pero también cuenta con otros aspectos muy beneficiosos:

- La potencia eólica es mucho mayor en el mar que en la tierra, llegando a ser el doble que en un parque terrestre
- Facilidad del transporte marítimo para mover equipos muy voluminosos durante la fase de construcción.
- Tanto la potencia instalada como la energía producida son mayores en un parque offshore.
- El impacto visual y acústico es menor,
- Las emisiones de CO₂ por kWh de la eólica marina analizando todo el ciclo de vida de la instalación, son más bajas que en los parques terrestres, principalmente debido a su mayor productividad [33].

3.5.2. Aspecto medioambiental

A pesar de que la energía eólica es una energía limpia y que apenas genera residuos, a lo largo de su ciclo de vida sí que se generan emisiones.

Según una serie de estudios realizados, los mayores contribuyentes a las emisiones son: la extracción de materias primas (30 %), la fabricación de

las turbinas (25 %) el transporte marítimo (10 %) y las emisiones asociadas a la construcción, como la excavación de suelos ricos en materia orgánica (30 %). El mantenimiento continuo suele representar menos del 5 % de las emisiones totales de GEI del ciclo de vida [12].

Las mayores estimaciones de emisiones se presentan en parques localizados en lugares que presentaban problemas de transporte, donde había que talar árboles o excavar suelos orgánicos. El emplazamiento en sí también puede suponer un aspecto negativo, ya que los parques eólicos son percibidos como ruidosos y no especialmente bonitos.

3.6. Energía solar

La energía puede aprovecharse directamente del sol, incluso con tiempo nublado. La energía solar se utiliza en todo el mundo y cada vez juega un papel más importante tanto para generar electricidad, como agua caliente, e incluso para desalinizar el agua del mar. Las centrales solares aprovechan la radiación del sol para generar electricidad, principalmente de dos maneras:

- **Energía fotovoltaica:** se obtiene energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos que captan la radiación del sol.
- **Energía solar térmica:** genera electricidad a partir del calentamiento de un fluido que mueve un generador gracias al vapor generado en un ciclo termodinámico convencional.

3.6.1. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica también conocida como PV (Photovoltaic) es una fuente renovable y limpia que se basa en el efecto fotoeléctrico, donde algunos materiales son capaces de absorber fotones y liberar electrones, generando una corriente eléctrica. En el caso de esta tecnología convierte la radiación solar en electricidad a través de unos dispositivos semiconductores (generalmente de silicio) llamados células solares [12], [34].

Como se muestra en la figura 3.8, los paneles de silicio captan la energía solar que incide sobre ellos, y esa radiación es absorbida por las células fotovoltaicas para generar electricidad. Finalmente, para llegar a nuestros hogares la corriente continua se pasará a alterna mediante un inversor. Posteriormente el transformador preparará la electricidad para ser transportada [35].

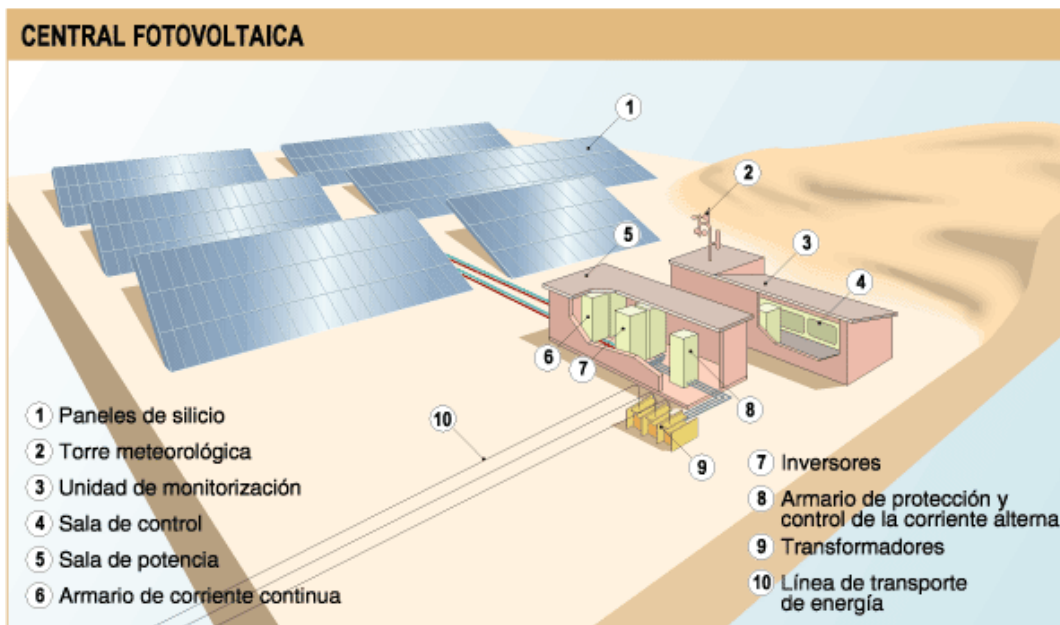


Figura 3.8: Esquema de una central solar fotovoltaica [10].

El coste de fabricación de los paneles solares se ha reducido considerablemente en las últimas décadas [36], incluso suponiendo en algunos casos la forma más barata de generar electricidad. También cuentan con una vida útil estimada de unos 30 años. Todo esto ha hecho que la energía solar sea una de las renovables con mayor crecimiento y apunta a que tendrá un papel importante en el futuro ‘mix’ de generación eléctrica mundial [36].

Este tipo de paneles tienen un espectro de aplicaciones inmenso, desde las aplicaciones más simples como en calculadoras, pasando por las placas para autoconsumo, para las casas o para autocaravanas, hasta aplicaciones más complejas como la generación eléctrica o en satélites artificiales [37].

3.6.2. Energía solar térmica

La energía solar térmica o energía solar concentrada, del término CSP (Concentrated Solar Power) es una de las tecnologías más eficientes y económicas, puesto que, utiliza un recurso autóctono, gratuito y en el punto de consumo. El empleo de esta energía supone una disminución del consumo de energía primaria y de las emisiones de CO₂, así como la mejora de la eficiencia energética donde se incorpora [38].

Esta tecnología de generación de electricidad se puede clasificar en:

- **Colector parabólico:** el receptor solar consiste en un conjunto de espejos parabólicos que reflejan la luz a un tubo absorbedor negro. Por este tubo circula un fluido de transferencia de calor (aceite térmico) que se bombea a un intercambiador de calor

para producir vapor en un ciclo Rankine para la generación de energía eléctrica [12].

A continuación, se muestra en la figura 3.9 una planta de este tipo



Figura 3.9: Central de colectores parabólicos distribuidos [35].

- **Receptor central o de torre central:** el colector consta de un conjunto de espejos de grandes dimensiones que concentran la radiación en un receptor situado en el centro y montado en la parte superior de una torre. El calor se transfiere a un fluido que circula por el interior del receptor y lo transforma en vapor, empezando así un ciclo convencional de agua-vapor. A continuación, en la figura 3.10 se muestra una central de receptor central.

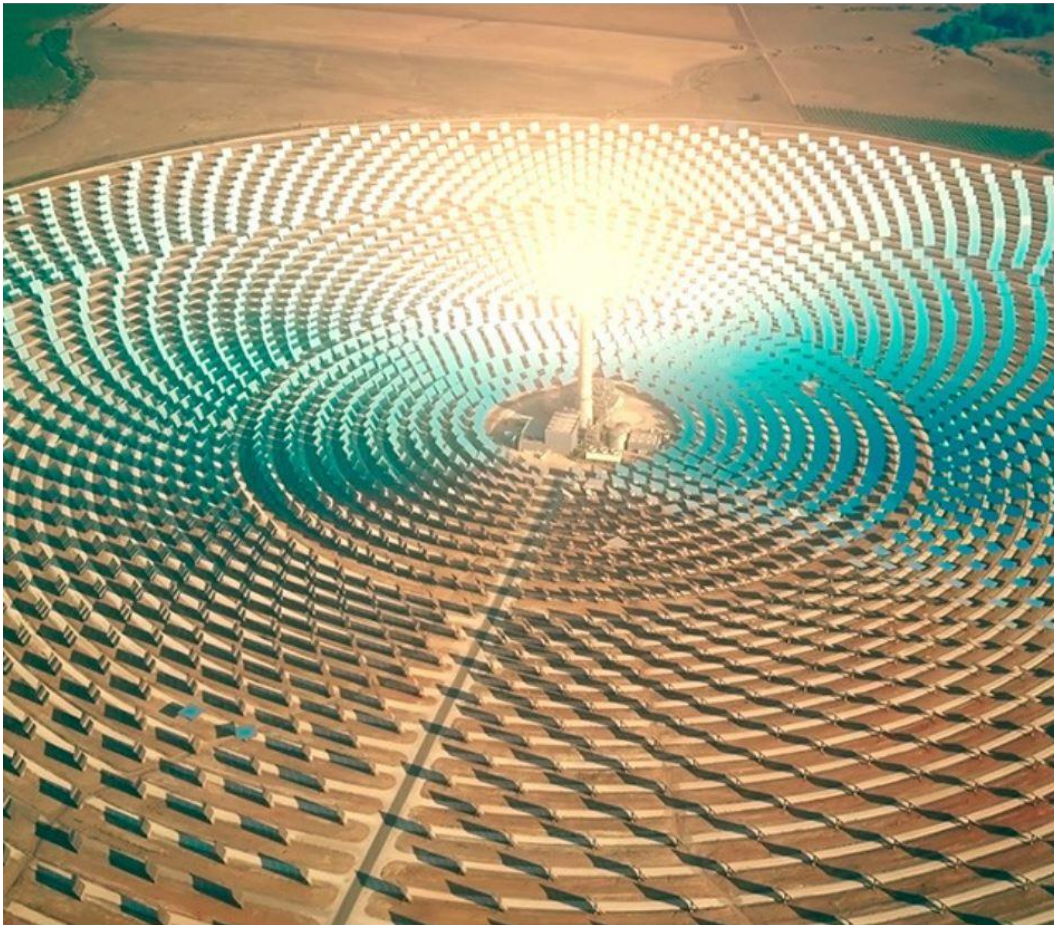


Figura 3.10: Central de torre central [35].

- **Disco paraboloidal:** emplea un reflector de disco paraboloidal como colector solar. Se emplea un motor de Stirling para lograr la conversión de calor en electricidad.
- **Chimenea solar:** se expone al sol una superficie plana cubierta de vidrio. El suelo y el aire bajo la cubierta de cristal se calientan hasta unos 35 °C por encima del ambiente (efecto invernadero). La cubierta está ligeramente inclinada hacia el centro, donde se instala una gran chimenea. Esto permite que el aire caliente se eleve y que la velocidad del viento aumente en la entrada de la chimenea.
- **Estanque solar:** consta de un gran depósito de agua con un fondo negro que absorbe la radiación solar difusa y de haz, transformándola en calor en forma de agua caliente.

Una de las principales ventajas de una central solar térmica respecto a una fotovoltaica es que puede equiparse con depósitos de sales fundidas, donde puede almacenarse la energía térmica, permitiendo generar electricidad incluso después de la puesta del sol [36].

A su vez tiene alguna desventaja considerable frente a la energía fotovoltaica, puesto que, requiere una inversión inicial mayor y para recolectar energía solar a gran escala es necesario grandes extensiones de terreno.

3.7. Otras renovables

A este tipo de tecnología la REE también le llama térmica renovables. Las energías térmicas renovables tienen cierta importancia en el 'mix' energético mundial. Dentro de este grupo, la fuente de energía más considerable es la energía a partir de biomasa y, en menor medida, la energía geotérmica.

3.7.1. Energía a partir de biomasa

La energía a partir de biomasa procede del aprovechamiento de la materia orgánica formada en algún proceso biológico, generada por los seres vivos. Existen diferentes tipos de biomasa, clasificándose en:

- **Biomasa natural:** es aprovechada en la naturaleza sin intervención humana. Abarca los bosques, plantas de cultivo, matorrales, etc.
- **Biomasa residual:** residuos orgánicos generados de actividades de las personas como, por ejemplo, basuras urbanas, serrín, estiércol, etc.

Este tipo de energía conlleva una serie de ventajas e inconvenientes frente a otro tipo de energías:

Ventajas

- Es una energía renovable, por lo que supone la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles y apenas contamina el medio ambiente.
- Ayuda a la limpieza de los montes y al uso de los residuos industriales.
- Existe una tecnología avanzada con garantía de funcionamiento, alto rendimiento y fiabilidad.
- Pueden utilizarse muchos combustibles en la misma caldera.

Inconvenientes

- Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo menores que en las calderas convencionales.
- Menor densidad energética, lo que hace que los sistemas de almacenamiento sean mayores.

CAPÍTULO 3

- Los canales de distribución de biomasa no están del todo desarrollados.
- Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos.

3.7.1.1. Producción de energía

Existen dos tipos más generales de aprovechamientos de la energía a partir de biomasa: generación de electricidad y usos térmicos.

Uso eléctrico de la biomasa: La obtención de energía eléctrica a partir de biomasa se lleva a cabo a través de la quema de biomasa en una caldera, lo que transforman el agua líquida del circuito en contacto con la caldera en vapor. Ese vapor generado en la caldera se dirige hacia una turbina de vapor, conectada al generador eléctrico donde se produce la energía eléctrica que se transportará a través de la red eléctrica. Finalmente, el vapor de agua se convierte en líquido en el condensador y, desde aquí, es nuevamente enviado al tanque de alimentación cerrándose así el circuito principal agua-vapor de la central.

Uso térmico de la biomasa: la obtención de energía térmica a partir de biomasa puede utilizarse para diferentes propósitos. Los más comunes son la producción de calor y agua caliente, aunque también existe la posibilidad de producir frío, de forma más compleja, como pueden ser las máquinas de absorción. Las aplicaciones térmicas de la biomasa se realizan normalmente en instalaciones industriales, en el sector doméstico y en servicios con elevada centralización [39].

3.7.1.2. Aspectos medioambientales

Es importante destacar que la biomasa es la única fuente de energía que aporta un balance de CO₂ favorable, siempre y cuando la obtención se realice de manera sostenible. Se dice que es un balance favorable cuando el consumo del recurso se realiza más lento que la capacidad de la Tierra para crearlo, por ello, la materia orgánica retiene más CO₂ del que libera en su combustión.

A pesar del gran potencial energético de esta energía, no se puede utilizar en su totalidad, puesto que supondría efectos como la deforestación. De modo que sería imposible mantener el consumo por debajo de la capacidad de regeneración, perdiendo así el mayor atractivo de esta energía, el balance favorable de CO₂ [40].

3.7.2. Energía geotérmica

Se considera energía geotérmica a la energía que se obtiene mediante el calor proveniente del interior de la Tierra, siendo el subsuelo terrestre un foco

térmico. Se manifiesta de forma natural en fuentes termales, géiseres, volcanes... Por lo general, este tipo de energía se utiliza para climatizar, suministrar agua caliente sanitaria y en la generación de electricidad.

El aprovechamiento de esta energía se puede realizar a varias temperaturas:

- **Baja temperatura:** Se aprovecha directamente del yacimiento y se encuentra a una temperatura menor de 100 °C, normalmente utilizada en calefacción, piscinas, invernaderos, etc. Tiene un inconveniente importante, y es que el centro de consumo debe estar cerca del yacimiento.
- **Media/alta temperatura:** Cuando la temperatura está por encima de 100 °C, se puede utilizar este recurso para la producción de energía eléctrica, bien mediante la expansión directa del vapor (en los yacimientos a mayor temperatura, sobre los 200 °C), bien mediante evaporaciones flash del líquido a alta temperatura, o mediante ciclos binarios orgánicos (ORC) en los yacimientos de menor temperatura (entre 100 °C y 150 °C).

Sin embargo, este tipo de energía no se abordará en este trabajo debido a que en la España peninsular no existen actualmente centrales para la generación de electricidad aprovechando este recurso [41].

3.8. Cogeneración

La fuente de REE nombra y considera en la misma sección la cogeneración y la térmica no renovable. Consiste en la producción y utilización conjunta, en un proceso secuencial, de electricidad y energía térmica útil. La cogeneración aporta actualmente un 11 % de la electricidad y un 15 % del calor en Europa [42].

Es importante promocionar la cogeneración siempre que se deba recurrir a combustibles fósiles para lograr los niveles de emisiones estipulados por la UE, contribuyendo además a la seguridad en el abastecimiento energético y al desarrollo sostenible.

Características de la cogeneración:

- **Alta eficiencia:** cuenta con un rendimiento mucho mayor de modo que aprovecha la energía del combustible más eficientemente, lo que también desemboca en una menor emisión de CO₂.
- **Ahorro de energía primaria:** asociado al alto rendimiento, por lo tanto, se utilizarán menores cantidades de energía primaria para la obtención de energía que en una central térmica convencional.

- **Reducción de emisiones:** consecuentemente un ahorro de la energía primaria supone una menor emisión de gases de efecto invernadero.
- **Generación distribuida de electricidad:** las plantas localizadas cerca de los centros de consumo generan un ahorro en el transporte y una disminución de las pérdidas en el transporte de la electricidad.

Todas estas características hacen que la cogeneración sea una tecnología limpia, incluso ahorra agua al reciclarlo en sus procesos y, por lo tanto, supone una tecnología importante en la contribución a la estabilidad del sistema energético [43].

3.8.1. Clasificación de los sistemas de cogeneración

Los sistemas de cogeneración se dividen según la conexión al alternador, según la secuencia en generación y consumo, según el aprovechamiento de la energía térmica y según el motor térmico empleado, siendo este último el factor más utilizado normalmente. A continuación, en la Tabla 3.1 están representados cada tipo de cogeneración según los factores mencionados anteriormente [44].

Tabla 3.1: Clasificación de los sistemas de cogeneración [44].

Conexión al alternador	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas aislados • Sistemas integrados
Secuencia en generación y consumo	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclos de cabecera (Topping) • Ciclos de cola (bottoming)
Aprovechamiento de la energía térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de calefacción • Sistemas de refrigeración • Trigeneración (calor + frío)
Motor térmico empleado	<ul style="list-style-type: none"> • Turbina de Vapor • Turbina de gas • Motor de combustión interna alternativo

Generalmente cuando se habla de clasificación de la cogeneración se refiere a en función del motor empleado, de modo que se detallarán la características de cada cogeneración según este factor.

3.8.1.1. Turbina de vapor

La cogeneración con turbina de vapor trabaja en procesos continuos con cargas totales. Se caracteriza por tener altos rendimientos, mucha seguridad, largo periodo de vida (25 - 30 años) y la capacidad de utilizar todo tipo de

combustibles; sin embargo, como desventajas, supone un coste de inversión elevado, la puesta en marcha es muy lenta y la relación calor electricidad (RCE) es baja.

Cabe destacar que este tipo de instalaciones requiere de una serie de sistemas específicos, como sistemas de eliminación de cenizas y un abundante suministro de agua. Debido a ello es necesario mucho personal en la planta puesto que supone un mantenimiento diario [45].

3.8.1.2. Turbina de gas

El sistema basado en cogeneración con turbina de gas opera en procesos continuos con cargas totales, al igual que el de turbina de vapor, pero este sistema tiene otras ventajas: una alta fiabilidad, alta temperatura de la energía térmica, la posibilidad de postcombustiones para incrementar el calor útil, lo que produce un gran abanico de aplicaciones. Como contrapartida los combustibles deben ser de alta calidad y la vida útil de estos equipos es de (15 – 25) años.

Por otra parte, requiere de la instalación de unos sistemas específicos como filtros de aire de admisión y silenciadores de admisión y escape. Este tipo de instalaciones supone un punto intermedio entre la turbina de vapor y el motor alternativo, teniendo una RCE intermedia [45].

3.8.1.3. Motor alternativo de combustión interna (MCIA)

El MCIA opera de forma discontinua con cargas parciales y se caracteriza por tener una RCE alta, lo que supone una alta conversión de la energía térmica del combustible en energía mecánica. Sin embargo, el calor útil debe obtenerse de gases de escape o de la refrigeración de las camisas del motor, por lo que la energía térmica es de baja temperatura y genera un elevado coste de mantenimiento.

Cabe destacar que el MCIA ofrece una alta eficiencia eléctrica pero bajos rendimientos de recuperación de calor, contando con las ventajas de ser capaz de trabajar con combustibles líquidos y con varias unidades en paralelo, lo que genera mucha flexibilidad ante la demanda, situación que en las turbinas de gas no se puede dar [44].

3.8.2. Aspectos medioambientales

La cogeneración es una herramienta clave para la mejora de la eficiencia energética, que a su vez es una pieza clave contra el cambio climático, puesto que, permite un gran ahorro de energía primaria, de millones de metros cúbicos de agua y de millones de toneladas de CO₂ emitidas.

Además, es un componente clave de la política medioambiental europea, contribuyendo a los principales objetivos:

- **Seguridad de abastecimiento:** la reducción del consumo energético facilita un acceso permanente a las fuentes de energía primaria a precios asequibles y las ventajas de la generación distribuida contribuyen a asegurar el suministro de energía final independientemente del nivel de la demanda.
- **Competitividad industrial:** la eficiencia energética potencia el crecimiento económico y el empleo.

Respeto al medioambiente, la reducción del consumo de energía por mejoras en eficiencia y en extensión del uso de combustibles más limpios tiene un impacto directo en la reducción de las emisiones de efecto invernadero y en la mitigación del cambio climático [44].

3.9. Aspectos energéticos y medioambientales

Existen ciertas características de las tecnologías de generación eléctrica que dan lugar a la viabilidad tanto económica, tecnológica y medioambiental de las mismas. Los tres aspectos más característicos son el rendimiento energético, el factor de utilización y el factor de emisiones.

Rendimiento energético: se considera rendimiento energético a la relación entre la energía útil obtenida y la energía suministrada a un sistema. Este término da una idea de las pérdidas que se producen en la transformación de la energía.

Factor de utilización: es el cociente entre la energía producida o consumida en una instalación, en un periodo de tiempo, y la energía que habría producido o consumido si hubiera funcionado a la potencia nominal.

Factor de emisiones: se define como el cociente entre la cantidad de emisiones contaminantes y la energía producida a partir de ese tipo de tecnología.

3.9.1. Energía hidráulica

La energía hidráulica tiene una alta transformación de la energía potencial gravitatoria en energía eléctrica, debido al uso de turbinas hidráulicas. Por otra parte, el factor de utilización de esta tecnología está sujeto a la presencia suficiente de agua en la presa, por lo que dependiendo de la zona geográfica habrá épocas de escasez, así como a las pérdidas por derrame de agua o necesidades en otras funciones y a las pérdidas hidráulicas.

A pesar de ser una energía renovable, la energía hidráulica tiene asociadas una serie de emisiones contaminantes en todo su ciclo de vida. Las principales fuentes de emisiones provienen del emplazamiento de la propia

presa junto con las actividades de construcción de la misma y de la cantidad de biomasa y terreno que debe ser inundados [12].

Características principales:

- Rendimiento energético: (80 – 90) % [45].
- Factor de utilización: media mundial del 44 % [46].
- Factor de emisión: (2 – 60) gCO₂-eq·kWh⁻¹, media de 20 gCO₂-eq·kWh⁻¹ [12].

Dentro de la energía hidráulica cabe destacar la energía hidráulica de bombeo, puesto que se debe tener en cuenta las pérdidas de rendimiento cuando se almacena y cuando se vuelve a turbinar. La hidráulica de bombeo otorga una gran disponibilidad de recursos de forma muy eficiente, además de reducir la necesidad de otro equipo de generación en horas punta. Sin embargo, tiene unas mayores pérdidas en gran parte debidas al desnivel que se debe librar. Esta tecnología cuenta con rendimientos del (64 – 80) % [47].

3.9.2. Energía nuclear

Las centrales nucleares tienen un rendimiento energético relativamente bajo, en torno a un 33 %, similar al de las centrales térmicas convencionales de carbón. Por otro lado, su factor de utilización es muy alto, ya que este tipo de centrales están en continuo funcionamiento, únicamente se paran para recargar combustible fisionable.

Las emisiones asociadas a esta energía están relacionadas, al igual que en las tecnologías renovables, a la construcción de la propia planta y el transporte de materias. Sin embargo, en esta tecnología se debe tener en cuenta los residuos radiactivos, puesto que deben ser tratados y controlados durante mucho tiempo para que no produzcan efectos medioambientales adversos.

Características principales:

- Rendimiento energético: (30 – 36) % [48].
- Factor de utilización: (70 – 98) %, media del 81 % en 2017 [49].
- Factor de emisiones: (16 – 55) gCO₂-eq·kWh⁻¹ [50].

3.9.3. Carbón

El factor de utilización de esta tecnología es alto comparado con otras tecnologías. Sin embargo, en ciertos países el factor de utilización es mucho menor. Esto se debe al interés por cumplir los objetivos de cero emisiones, cerrando las centrales térmicas de carbón ya que tienen el factor de emisiones más alto de todas las tecnologías, es decir, son las centrales que más contaminan.

Características principales:

- Rendimiento energético: 33 % [51].
- Factor de utilización: (70 – 90) %.
- Factor de emisiones: (900 – 980) gCO₂-eq·kWh⁻¹ [52].

3.9.4. Ciclo combinado

Las centrales de ciclo combinado tienen un mayor rendimiento en comparación con las centrales térmicas de carbón, en gran parte porque utilizan los gases que salen de la turbina de gas para alimentar un nuevo ciclo en una turbina de vapor. Esto, además de incrementar el rendimiento del proceso, reduce considerablemente las emisiones de CO₂. Es por eso por lo que el factor de emisiones es mucho menor que en las centrales de carbón.

De esta tecnología cabe destacar que en España el factor de utilización es mucho menor que en la mayoría de los países, debido al exceso de las centrales de este tipo, lo que genera una baja utilización media frente a la gran cantidad de potencia instalada.

Características principales:

- Rendimiento energético: 60 % [23].
- Factor de utilización: (40 – 70) % [53].
- Factor de emisiones: (300 – 500) gCO₂-eq·kWh⁻¹ [54]

3.9.5. Energía eólica

En la energía eólica existe una teoría importante, la teoría de Betz, que explica el límite del rendimiento de un aerogenerador, entendiendo rendimiento como la capacidad para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica.

La teoría de Betz determina que: *“La máxima potencia teórica extraíble de una corriente de aire con aerogenerador ideal no puede superar el 59 % de la potencia disponible del viento incidente”*. Concluye que sólo puede convertirse menos de 16/27 (59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador, en el mejor de los casos en el que no hubiera rozamiento y con una eficiencia de las palas del 100 % [55].

El factor de utilización de la energía eólica tiene un amplio rango, pero con bajos valores. Esto se debe a la variabilidad de la energía, puesto que siempre es dependiente de la situación geográfica, meteorológica y climática. En contraposición el factor de emisiones se puede considerar para cada uno de los tipos de energía eólica:

Factor de emisiones en la eólica terrestre:

A través de una serie de estudios realizados durante el ciclo de vida de las instalaciones de energía eólica en tierra, se ha podido determinar que el rango del factor de emisiones se encuentra entre (1.7 g a 81) gCO₂-eq·kWh⁻¹, con una media de 16 gCO₂-eq·kWh⁻¹, siendo las mayores emisiones de GEI del ciclo de vida las asociadas a instalaciones que presentaban problemas concretos de transporte [12].

Los mayores contribuyentes a estas emisiones de GEI son la extracción de materia primas (30 %), la fabricación de las turbinas (25 %), el transporte marino (10 %) y las emisiones asociadas a la construcción, como la excavación del terreno (30 %). Finalmente el 5 % restante representa el mantenimiento continuo de las instalaciones [12].

Factor de emisiones en la eólica marina:

Este tipo de eólica está menos extendido, por lo tanto, los estudios sobre esta son más limitados que en la terrestre. A partir de los estudios realizados se ha obtenido un rango de factor de emisiones de entre (5.3 a 24) gCO₂-eq·kWh⁻¹, con una media de 13 gCO₂-eq·kWh⁻¹. En comparación con la energía eólica terrestre las emisiones de GEI del ciclo de vida de la energía eólica marina tienden a ser más bajas. Esto se debe a que las instalaciones en alta mar son mucho más grandes, produciendo más energía a lo largo de su vida útil, y el transporte es menos costoso; también se estima que las emisiones de GEI durante la fase de construcción en tierra firme son más elevadas que en sus homólogas en alta mar, puesto que a menudo requieren de la destrucción de hábitats forestales generando importantes emisiones [12].

3.9.6. Energía solar

En la energía solar hay que hacer una distinción entre la energía solar fotovoltaica y la solar térmica, ya que tienen distintos rendimientos y factores. Sin embargo, el factor de utilización de ambos está muy próximo; en la energía solar el factor de utilización es limitado, de valores en torno al 15 % para la fotovoltaica y 20 % en la térmica.

Esto se debe a la dependencia del sol en esta energía, en función del emplazamiento habrá zonas con mayor presencia de sol. Además, también depende del momento del día, puesto que las instalaciones no trabajan tras ocultarse el sol, salvo la solar térmica que al estar equipada con sales fundidas puede almacenar parte del calor.

Solar fotovoltaica:

El rendimiento está ligado al rendimiento de las células fotovoltaicas el cual depende del tamaño, la potencia y el material de estas. El rendimiento máximo de estas células está en torno al 20 % [56].

A partir de varios estudios del ciclo de vida de los sistemas solares fotovoltaicos, se ha estimado un factor de emisiones de GEI entre (15.6 a 50) $\text{gCO}_2\text{-eq}\cdot\text{kWh}^{-1}$, con una media de $30.5 \text{ gCO}_2\text{-eq}\cdot\text{kWh}^{-1}$ [12].

Solar térmica:

Los equipos de energía solar térmica son mucho más eficientes que los equipos fotovoltaicos a la hora de transformar la radiación solar en energía eléctrica, llegando a coeficientes de eficiencia del (80 - 90) %. En contraposición, la energía fotovoltaica ha experimentado un gran desarrollo de sistemas de almacenamiento en batería, cada vez más sofisticados [57].

Respecto al factor de emisiones, se hablará de las centrales de receptor central, puesto que son las más importantes y de las que más estudios se encuentran. Estas centrales tienen unas emisiones de GEI estimadas entre (36.2 a 43) $\text{gCO}_2\text{-eq}\cdot\text{kWh}^{-1}$, con una media de $39.6 \text{ gCO}_2\text{-eq}\cdot\text{kWh}^{-1}$. Cabe destacar que para los demás tipos de solar térmica casi no existen estudios en los que basarse [12].

3.9.7. Biomasa

Debido al alto porcentaje de humedad y el bajo poder calorífico de la biomasa, la generación de electricidad a partir de biomasa requiere altas inversiones, pues se necesitan instalaciones con calderas de mucha potencia para producir cantidades significativas de energía eléctrica [58].

Características principales:

- Rendimiento energético: entorno al 30 % [58].
- Factor de utilización: (70 - 75) % [59].
- Factor de emisiones: $118 \text{ gCO}_2\text{-eq}\cdot\text{kWh}^{-1}$ [12].

3.9.8. Cogeneración

El rendimiento en la cogeneración está determinado por la máquina térmica usada en el proceso, dependiendo del uso de cada una de ellas su rendimiento cambia. Además, la cogeneración se define como la producción conjunta de electricidad y calor útil, por lo tanto, no existe un solo rendimiento, sino que se puede hablar de un rendimiento eléctrico, un rendimiento térmico y un rendimiento global.

Rendimiento eléctrico, se define como la relación entre la potencia eléctrica generada en la cogeneración y la potencia térmica aportada (energía del combustible suministrado). Mientras que el rendimiento térmico se entiende como el cociente entre la potencia térmica útil usada en el proceso y la potencia térmica aportada al proceso (energía del combustible suministrado).

Ambos rendimientos dan lugar a un parámetro todavía más interesante en la cogeneración, el Rendimiento Eléctrico Equivalente, este rendimiento se define como el rendimiento eléctrico comparable con una planta de sólo generación de energía eléctrica, descontando del combustible consumido el necesario para producir por sistemas convencionales el calor. Este índice permite comparar la eficiencia eléctrica de una planta de cogeneración con el rendimiento eléctrico o global de una planta de sólo producción de energía eléctrica. Sin embargo, esta comparación directa con plantas del régimen ordinario no tiene en cuenta las pérdidas evitadas en las redes de transporte [60].

- **Turbina de vapor:** El rendimiento eléctrico equivalente de estos sistemas es del 49 %, mientras que el rendimiento global de (80 – 90) % [61].
- **Turbina de gas:** El rendimiento eléctrico equivalente en una turbina de gas es del 59 %, con un rendimiento global del (85 – 90) % [61].
- **Motor alternativo de combustión interna (MCIA):** En los sistemas de cogeneración con MCIA el rendimiento eléctrico equivalente es del 55 %, con un rendimiento global del proceso entre (50 – 70) % [61].

Cabe destacar que generalmente el factor de emisión para la tecnología de cogeneración está en torno a $37 \text{ gCO}_2\text{-eq/kWh}^{-1}$ [54].

3.10. Aspectos económicos

En este apartado se determinará la competitividad de cada tecnología en términos del coste nivelado de la electricidad (LCOE, levelized cost of electricity). Para ello se tiene en cuenta la vida útil de una central de cada tipo de tecnología descrita anteriormente. Utilizando los gastos en instalación, funcionamiento y desmantelamiento de la planta y la energía útil producida durante la vida de la instalación, de modo que se obtiene una relación de los costes por energía de la instalación [62].

Cabe destacar que en el estudio en el que ha sido basado este trabajo, se tiene en cuenta la inflación del dinero durante el tiempo que está activa la central, considerando un 3 % de inflación.

CAPÍTULO 3

Tal y como se puede contemplar en la figura 3.11 están representadas otros tipos de plantas no nombradas con anterioridad. Todas ellas son centrales a las que se les han aplicado otros procesos, los cuales se van a tener en cuenta para comparar la viabilidad económica frente a otro tipo de instalaciones. Estos tipos adicionales son:

- **Nuclear (LTO):** este tipo de instalaciones son plantas de larga duración, más concretamente centrales a partir de 20 años, las cuales están totalmente amortizadas y se les aplican unas pequeñas mejoras para mantener su operación un mayor tiempo.
- **Lignite CCS, Coal (CCS) y Gas (CCGT, CCS):** estas instalaciones comparten la característica de que tienen implementado un sistema de captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de CO₂, existiendo un sobrecoste frente a las centrales sin este tipo de sistemas.

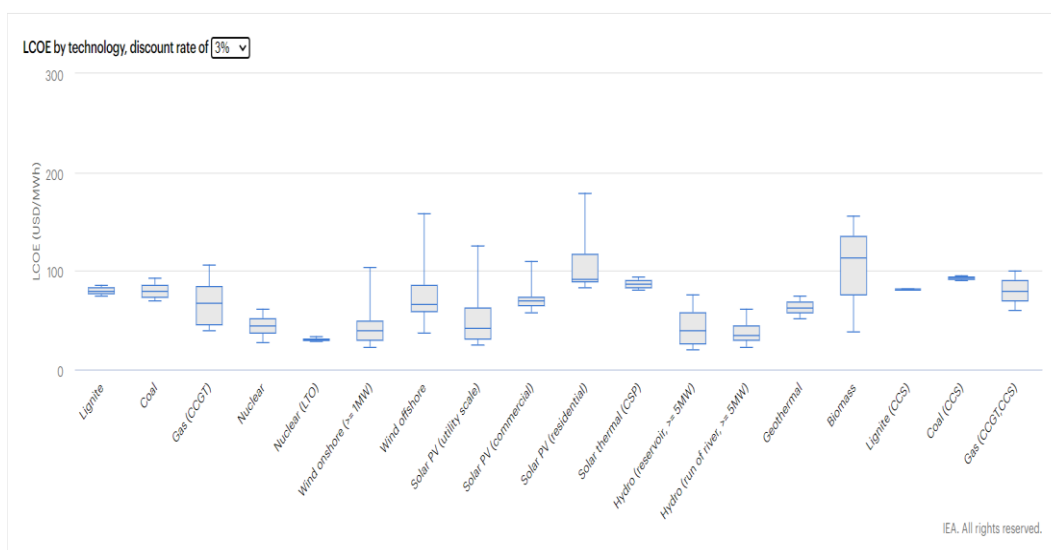


Figura 3.11: Gráfica del LCOE para cada tipo de tecnología [62].

CCGT, combined cycle gas turbine: ciclo combinado con turbina de gas.

LTO, long-term operation: operación a largo plazo.

CSP, concentrated solar power: energía solar concentrada.

CCS, carbon capture and storage: con captura y almacenamiento de carbono.

USD: United States Dollar

De la gráfica LCOE de cada tipo de tecnología se pueden inferir la siguiente serie de datos relevantes de cara a la viabilidad económica de cada energía:

- La tecnología solar fotovoltaica tiene un LCOE medio de 56 \$/MWh, sin embargo, dependiendo de las características de la

instalación, así como de la localización puede lograr valores de 34 \$/MWh e, incluso, en el caso de ciertas instalaciones un coste de 172 \$/MWh. Este gran coste en comparación con la media normalmente se debe a unas condiciones climática desfavorables para esta tecnología. En contraposición la solar térmica tiene un LCOE medio de 121 \$/MWh mucho mayor que la fotovoltaica, pero con muy poca dispersión.

- Respecto a la energía eólica se puede comprobar que la eólica marina tiene mayores costes en general, con un LCOE medio de 88 \$/MWh, en comparación con la eólica terrestre, con un LCOE medio de 50 \$/MWh. Los sobrecostes de las instalaciones en alta mar se deben principalmente a la construcción de las plataformas, al contrario que en la eólica terrestre que no necesitas construir una infraestructura tan cara para el parque eólico.
- Cabe destacar que la mayor dispersión en el LCOE se encuentra en las energías renovables, lo que generalmente se debe a la variabilidad de ellas, ya que son dependientes de factores climáticos, geográficos o meteorológicos.
- La energía nuclear cuenta con un LCOE medio de 69 \$/MWh y una considerable dispersión. Sin embargo, una planta nuclear de operación a largo plazo tiene un LCOE medio de 32 \$/MWh sin prácticamente ninguna dispersión, ya que al estar totalmente rentabilizada la instalación, toda la energía útil que obtenga la planta hará disminuir el LCOE.
- Por último, hay que destacar la presencia de los equipos de captura y almacenamiento de carbono en las instalaciones de lignito, carbón y gas; mientras que las instalaciones sin estos equipos cuentan con un LCOE medio de 95 \$/MWh, 88 \$/MWh y 71 \$/MWh, respectivamente, para las plantas que sí tienen integrados estos sistemas tienen un LCOE medio de 118 \$/MWh (Lignito con CCS), 116 \$/MWh (Carbón con CCS) y 91 \$/MWh (Gas con CCS). Obviamente el LCOE será mayor puesto que estas plantas tienen un coste extra, sin embargo, parece que la diferencia de LCOE con respecto a las emisiones que se logran reducir hacen a estas plantas convenientes.

4. Problemas medioambientales de la producción de energía eléctrica

4.1. Problemas medioambientales

Como se ha podido entender de apartados anteriores, la producción de energía eléctrica genera emisiones GEI, e incluso puede ser un sector importante en la contribución a las emisiones de un país. Generalmente las emisiones de GEI son formadas en procesos de combustión, estos gases son CO₂ y NO₂, entre otros, contribuyendo de forma negativa para el medioambiente al acelerar el cambio climático.

Muchas veces se utiliza el término cambio climático como sinónimo de calentamiento global, sin embargo, desde un punto de vista más técnico, el calentamiento global se define como el aumento de la temperatura de la Tierra, mientras que se utiliza “cambio climático” para describir los complejos cambios que afectan a los sistemas meteorológicos y climáticos en nuestro planeta. Estos abarcan así fenómenos meteorológicos extremos, cambios en la flora y fauna, la subida del nivel de los mares y otros efectos.

El efecto invernadero se produce cuando la luz del sol incide sobre la superficie terrestre, donde es absorbida y, a continuación, regresa a la atmósfera en forma de calor, pero los GEI, o también conocidos por sus siglas en inglés como GHG (Greenhouse gases), retienen ese calor en la Tierra dejando pasar únicamente la luz, al igual que las paredes de un invernadero. Por lo tanto, cuantos más GEI emitidos mayor es el calor retenido.

Este efecto fue estudiado por Joseph Fourier en 1824 y no solo tiene consecuencias dañinas, sino que este efecto es el causante de que el clima de la Tierra sea el óptimo para la vida. En 1895, el químico suizo Svante Arrhenius descubrió que el efecto invernadero aumentaba al producirse dióxido de carbono, lo cual supuso las bases de la comprensión del calentamiento global.

Se estima que la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera ha aumentado más de un tercio desde la revolución industrial debido a la quema de combustibles fósiles y otras actividades que generan GEI. Este hecho, tiene consecuencias desastrosas para el futuro del planeta, puesto que podrían llegar a derretirse las capas de hielo que permanecen en la Tierra, lo que implica el aumento considerable del nivel del mar, junto con cambios extremos en las condiciones meteorológicas y la pérdida del suministro del agua proveniente de los glaciares. La NASA y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA) abalan este hecho con registros: “once de los doce años más calurosos desde que se tienen registros se produjeron entre 1995 y 2006.” Incluso “el año 2015 fue el año más cálido desde que existen registros, que arrancaron en 1880” [63], [64].

4.2. Emisiones asociadas a la producción de energía eléctrica

Este trabajo se centra específicamente en las emisiones de CO₂ del sistema eléctrico español. Estas emisiones de CO₂ son contabilizadas a través de las emisiones de CO₂ equivalente, de modo que supone una medida métrica utilizada para comparar las emisiones de varios GEI sobre la base de su potencial de calentamiento global o Global Warming Potential (GWP) convirtiendo las cantidades de otros gases en la cantidad equivalente de CO₂ con el mismo GWP. Según la metodología del IPCC estas emisiones son calculadas según los potenciales de calentamiento atmosférico vigentes y las toneladas métricas de gas (en millones).

La generación de electricidad en España supone una gran parte de las emisiones del país. Tal es así que en 2018 supuso el 18 % de las emisiones, solamente superado por el sector del transporte (27 %) y la industria (20 %). A continuación, se puede observar en la figura 4.1 las emisiones de CO₂ equivalente en 2018 por sector [65].

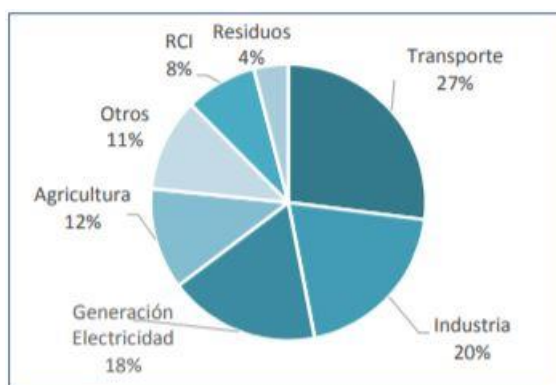


Figura 4.1: Distribución de emisiones brutas de CO₂ equivalente en 2018 por sector [65].

Las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de energía eléctrica en España se han reducido de forma drástica desde el año 2007 llegando hasta una reducción del 55 % de las emisiones en el año 2018 respecto al 2007 [54]. Los motivos principales de este logro han sido por una parte el aumento de la potencia instalada procedente de energías renovables y, por otra parte, la grandísima reducción de la producción de carbón, pasando de cerca de 1 000 MtCO₂-eq en 2005 a aproximadamente 30 MtCO₂-eq en 2020, como se puede apreciar en la figura 4.3. De hecho, en el mes de diciembre de 2019 se produjo un hecho inédito en la historia del sistema eléctrico español, el llamado “cero en carbón”, es decir, un día entero sin generar ni un solo megavatio hora con combustibles fósiles [54]. Esta reducción de las emisiones trajo consigo un efecto en el factor de emisiones global, pasando de 0.29 tCO₂-eq·MWh⁻¹ en 2015 a 0.19 tCO₂-eq·MWh⁻¹ en 2019 [65].

Muchos de estos desarrollos en tecnologías renovables son debidos al Acuerdo de París de diciembre de 2015, donde se fijó el compromiso de contener el incremento de la temperatura de la Tierra por debajo de 2°C y sentando las bases para los posteriores objetivos de las Naciones Unidas sobre cambio climático [65].

Los GEI considerados por el IPCC y por el Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEI) son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los compuestos derivados del flúor o gases fluorados (F-gases). En la figura 4.2 se muestran las emisiones correspondientes al año 2018 por cada GEI [66].

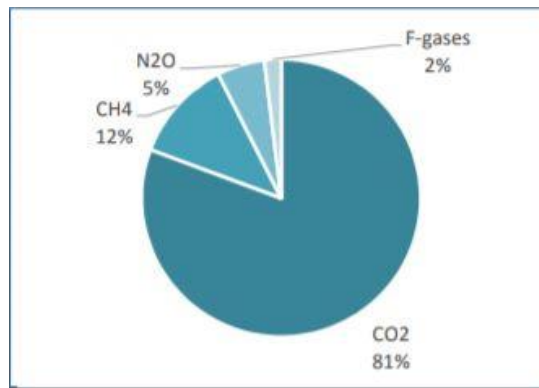


Figura 4.2: Distribución de emisiones brutas de GEI en 2018 según el tipo de gas [65].

Para tener en cuenta estos GEI, se necesita conocer su potencial de efecto invernadero. Por ejemplo, el óxido nitroso (N₂O) tiene un GWP asignado por la IPCC de 265, lo que significa que 1 gramo de N₂O tiene un GWP equivalente a 265 gramos de CO₂ [66], mientras que el metano tiene un GWP de 86 [54].

4.3. Metodología para las emisiones de CO₂ equivalente de la generación eléctrica en España

4.3.1. Metodología REE

Esta metodología de la Red Eléctrica Española es utilizada por la mayoría de organismos en Europa y permite obtener unos factores de emisión de CO₂-eq desglosados por tecnología y combustible. A partir de los factores de emisión expresados en tCO₂-eq·MWh⁻¹ se obtienen las emisiones de CO₂-eq emitidas por un generador, multiplicando el factor de emisión de cada tipo de tecnología por la energía producida en MWh por el generador [65].

Cabe destacar que los factores de emisión únicamente tienen en cuenta las emisiones directas asociadas a la producción de electricidad y no incluyen

CAPÍTULO 4

emisiones indirectas asociadas a la construcción de las plantas de generación, transporte de combustibles, mantenimiento, etc. Por lo tanto, esta metodología considera que las plantas cuyo funcionamiento no depende de la combustión de combustibles fósiles no generan emisiones de CO₂-eq en la producción de energía [65].

Además, para el cálculo de los factores de emisión de CO₂-eq se tienen en cuenta las emisiones de CO₂ y las de NO_x asociadas a la generación de electricidad, pese a que las emisiones de óxidos de nitrógeno solamente son significativas en el caso de la cogeneración [65].

Siguiendo esta metodología y con ayuda de los datos de la REE se han obtenido las emisiones de CO₂-eq para cada una de las tecnologías, así como las emisiones globales relativas a la España peninsular desde 1990, representadas en la figura 4.3. Cabe destacar que únicamente se tiene en cuenta la península puesto que el sistema eléctrico de las islas puede ser estudiado de forma independiente al sistema peninsular.

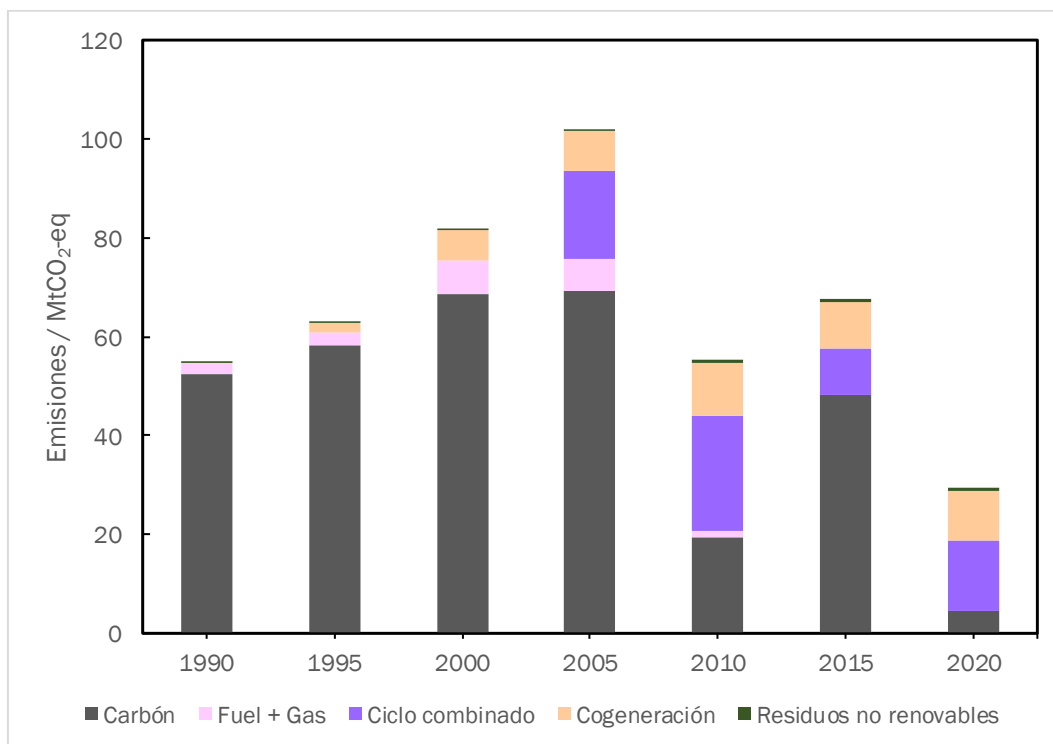


Figura 4.3: Gráfica de las emisiones de CO₂ equivalente asociadas a la generación de electricidad en la España peninsular según la metodología REE [67].

La figura 4.3 genera mucha información sobre las acciones de ayuda al medioambiente por parte de España. Claramente se puede ver el importante cierre de las centrales térmicas de carbón en los últimos años, llegando a 2020 con unas cifras de menos de 5 MtCO₂-eq, lo que supone un mínimo histórico. Además, se prevé que para 2022 las emisiones de las plantas de carbón en la península sean cero. Hay que destacar la desaparición de las emisiones

procedentes de 'Fuel + Gas' a partir del año 2012, aunque a partir del 2010 ya comenzaron a ser insignificantes.

También se puede inferir una clara estabilidad de la cogeneración, situándose con unas emisiones entre (10 – 11) MtCO₂-eq, lo que quiere decir que la cogeneración en España está totalmente consolidada.

Respecto al ciclo combinado, se pretende que la producción energética que se obtenía del carbón sea suministrada mediante el ciclo combinado y las energías renovables. Por lo tanto, la constante disminución de las emisiones procedente del carbón llevará consigo un crecimiento en las emisiones de ciclo combinado.

Finalmente es importante tener en cuenta de forma global todas estas emisiones. Tal y como se aprecia con claridad, existe una tendencia descendente de las emisiones procedentes de combustibles fósiles, lo que implica una gran transición hacia las energías renovables debida a la descarbonización.

4.3.2. Metodología LCA

La metodología LCA (Life-Cycle Assessment) o ACV (Análisis del ciclo de vida) estima las emisiones de GEI de las tecnologías de producción de energía renovables durante todo su ciclo de vida, es decir, desde la construcción hasta el desmantelamiento. También tiene en cuenta el uso y la gestión del suelo como parte del ciclo de vida, ya que es un factor importante de las emisiones totales de GEI que a menudo se pasa por alto [12].

A pesar de que existen más tipos de emisiones ambientales (por ejemplo, NO_x y SO₂) esta metodología se centra en las emisiones de GEI como CO₂ y CH₄ procedentes de fuentes de energía renovables [12].

De la misma forma que en la anterior metodología, se obtienen las emisiones de CO₂-eq a través de los factores de emisión expresados en tCO₂-eq·MWh⁻¹ para el ciclo de vida completo de cada fuente de energía renovable.

Basándose en los factores de emisiones de esta metodología y utilizando los datos anuales de energía producida por cada fuente de energía renovable, se han obtenido las emisiones anuales de las energías renovables del sistema eléctrico español, tal y como se muestra en la figura 4.4.

CAPÍTULO 4

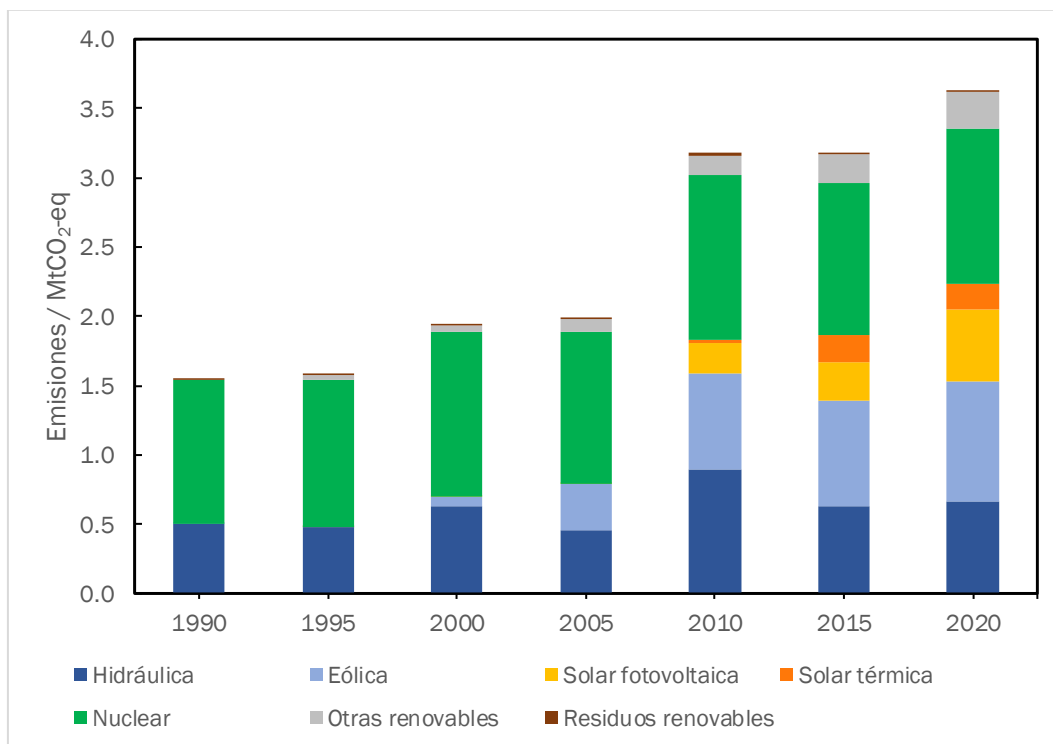


Figura 4.4: Gráfica de las emisiones de CO₂ equivalente asociadas a la generación de electricidad en la España peninsular según la metodología LCA [12].

Por una parte, a partir de la figura 4.4 se puede valorar la importancia de la energía nuclear, puesto que, a pesar de que hoy en día exista menos potencia instalada con respecto a la energía eólica o hidráulica, la energía nuclear genera más emisiones debido a que, a su vez, produce más energía por tener un factor de utilización mayor.

De forma general siguiendo la metodología LCA las emisiones de las energías renovables tienen mucha correlación con la potencia instalada, debido a que la mayor parte de las emisiones proceden de la construcción y desmantelamiento de las propias plantas, por lo que, una vez puestas en marcha, estas emisiones se mantienen casi constantes en el tiempo.

Es muy importante tener en cuenta que no se pueden comparar estas dos metodologías de forma conjunta, puesto que la primera metodología no tiene en cuenta las emisiones indirectas y la segunda sí. Sin embargo, de forma general se aprecia una tendencia creciente de las emisiones de energías renovables, al mismo tiempo que se aprecia la tendencia decreciente de las emisiones de combustibles fósiles, tal y como se comentó anteriormente. Esto se debe a la transición que está realizando España para incentivar las energías renovables dejando atrás los combustibles fósiles.

Finalmente, cabe destacar que a pesar de que las emisiones correspondientes a esta metodología crezcan, comparando los órdenes de magnitud de emisiones de una y otra, se puede determinar que a pesar de que

aumente la energía de origen renovable, sus emisiones son mucho menores que las asociadas a los combustibles fósiles calculadas con la primera metodología, como puede verse en la escala del eje vertical de las figuras 4.3 y 4.4.

4.3.3. Metodología LCA extra

Aunque la metodología LCA antes detallada solamente se ha aplicado para las tecnologías libres de combustibles fósiles, también se puede aplicar a las tecnologías fósiles. Para ello, en este apartado se va a realizar un aumento del 10 % respecto a las emisiones directas de las tecnologías fósiles, estimando así la implicación de las emisiones indirectas, cuyos datos no están recogidos en la metodología REE.

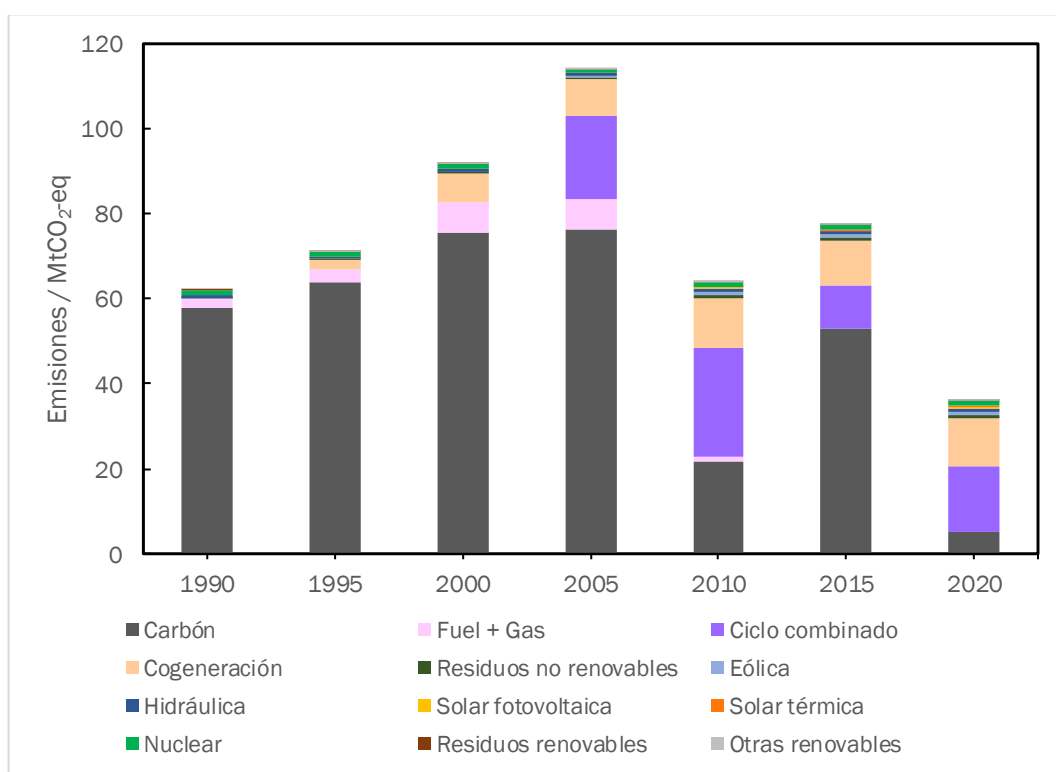


Figura 4.5: Gráfica estimada de las emisiones de CO₂ equivalente asociadas a la generación de electricidad en la España peninsular según la metodología LCA extra [12], [67].

Como se puede ver en la figura 4.5, la ventaja de este análisis es que siguiendo esta metodología se pueden comparar las emisiones de ambos tipos de tecnologías, además de ser una metodología más exacta a la hora de abordar los objetivos climáticos impuestos por Europa.

4.4. Otros problemas medioambientales

Existen otras cuestiones medioambientales como otros tipos de contaminantes que generan perjuicios en el medioambiente o complicaciones derivadas de la producción de energía. A continuación, se detallarán esta serie de problemas medioambientales

4.4.1. Óxidos de azufre

El dióxido de azufre, SO_2 , es un gas incoloro y no inflamable que se emite a la atmósfera producto de las actividades humanas, por la combustión de carbón y petróleo en instalaciones generadoras de energía.

Este óxido de azufre tiene graves efectos tanto sobre la salud humana como en el medio ambiente; es un gas irritante y tóxico que afecta a los pulmones si es absorbido de forma nasal, además la exposición de altas concentraciones durante cortos periodos de tiempo puede causar numerosos problemas como bronquitis, reacciones asmáticas o paradas respiratorias.

Los efectos de los SO_x son peores cuando el dióxido de azufre se combina con la humedad del aire, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) y provocando la conocida como “lluvia ácida”, caracterizada por la precipitación de lluvia con elevadas concentraciones de ácido sulfúrico que causa la acidificación de las aguas [68].

4.4.2. Óxidos de nitrógeno

El contaminante principal dentro de los óxidos de nitrógeno (NO_x) es el dióxido de nitrógeno NO_2 , formado como subproducto en todas las combustiones a altas temperaturas generalmente de combustibles fósiles. Al igual que los óxidos de azufre tiene efectos adversos tanto para la salud humana, pudiendo originar un edema pulmonar o graves problemas en el tejido pulmonar, como para el medio ambiente [69].

Con respecto a los impactos medioambientales, se trata de una sustancia de gran transcendencia en la formación del smog fotoquímico, puesto que influye en las reacciones de formación de ozono en la superficie de la Tierra al combinarse con otros contaminantes. El smog fotoquímico es una niebla oscura que provoca cambios en el clima ya que evita que se produzca la lluvia [70].

Además, otra característica del dióxido de nitrógeno es la rápida oxidación en ácido nítrico (HNO_3), que, al igual que el ácido sulfúrico, produce lluvia ácida.

4.4.3. Residuos nucleares

Las centrales nucleares producen residuos durante su funcionamiento, los cuales se mantienen radiactivos durante miles de años. Las consecuencias de la exposición a una radioactividad elevada son letales para el ser humano, y en dosis más bajas puede provocar enfermedades hereditarias graves.

Los residuos radiactivos deben gestionarse de forma correcta contando con instalaciones adecuadas para acondicionarlos, tratarlos y almacenarlos de forma segura y eficaz. Por ejemplo, en España los residuos se almacenan en el almacén centralizado de “El Cabril” en Hornachuelo (Córdoba). El almacenamiento se basa en la interposición de barreras y celdas de hormigón que aíslan los residuos radiactivos durante el tiempo necesario para convertirse en sustancias inocuas [71].

5. Estructura de la producción de energía eléctrica en España

En este apartado se presentará la estructura de la producción de energía eléctrica en España a partir de los datos obtenidos de la página web de Red Eléctrica Española, REE [67]. En primer lugar, el trabajo se centrará únicamente en el sistema de generación eléctrica de la España peninsular, teniendo en cuenta una serie de años desde 1990 hasta 2020. De este modo se utilizarán años de cinco en cinco hasta el 2020.

Además, la estructura se enfocará utilizando la potencia instalada, la producción y la estructura de generación de cada una de las tecnologías empleadas.

5.1. Situación actual de sistema eléctrico de la España peninsular

A lo largo de los años la estructura de la generación de electricidad ha ido cambiando, sobre todo hace unos años cuando se estableció el objetivo futuro de reducir a cero las emisiones y abandonar definitivamente los combustibles fósiles.

Un aspecto de la electricidad es que no puede ser almacenada económicamente en grandes cantidades, lo que genera la necesidad de consumirla al mismo ritmo que se produce. Esto conlleva una buena estructura de transporte y distribución de la energía eléctrica; en el esquema de la figura 5.1 se muestra el sistema de transporte, distribución y generación de electricidad en España.

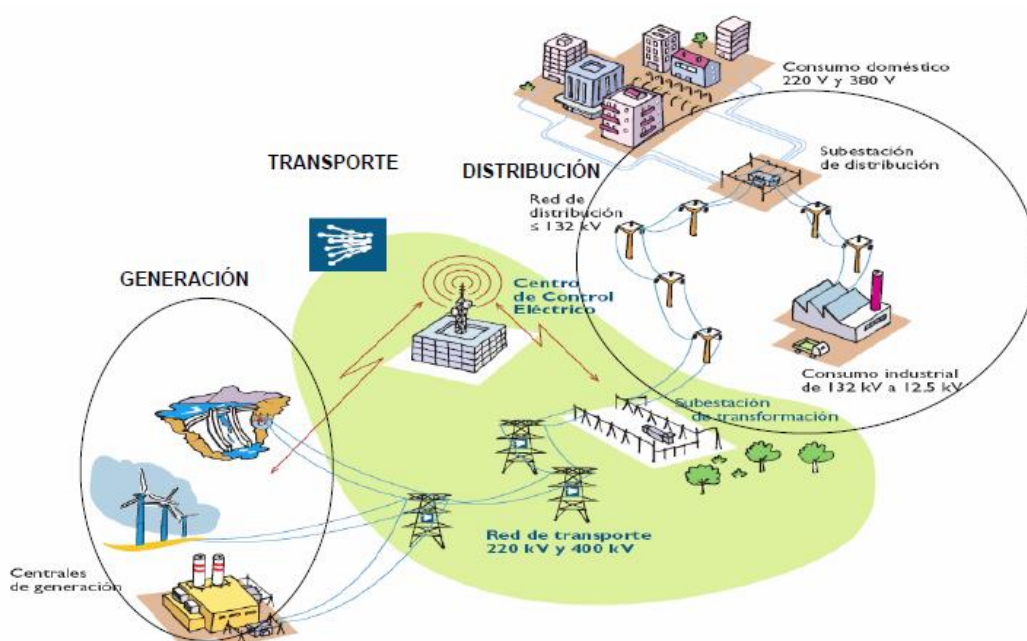


Figura 5.1: Esquema básico del Sistema Eléctrico en España [67].

5.1.1. Potencia instalada

La potencia instalada se entiende como la capacidad de energía que puede generar una central eléctrica en condiciones ideales, por lo tanto, normalmente no se consigue tanta potencia efectiva como la instalada [72].

En este apartado se detallará la potencia instalada de cada tipo de tecnología para el año 2020, de forma que se contextualice el peso de cada una de ellas en el sistema eléctrico español, tal y como se puede ver en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Potencia instalada en la España peninsular en el 2020 [67].

Potencia Instalada / MW	2020
Hidráulica ¹	20 412
Eólica	26 811
Solar fotovoltaica	11 277
Solar térmica	2 304
Otras renovables ²	1 071
Residuos renovables	119
Nuclear	7 117
Ciclo combinado	24 562
Carbón	5 492
Cogeneración ³	5 622
Residuos no renovables	438
Total	105 224

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Hoy en día en España las energías renovables han tomado un peso importantísimo, como se muestra la tabla 5.1, y la tendencia dice que se seguirá instalando más potencia de estas energías.

Cabe destacar la baja potencia instalada del carbón, incluso siendo superado por la cogeneración. Esto es debido al objetivo final de la descarbonización, puesto que de cara al futuro se irán cerrando las centrales que utilicen combustibles fósiles hasta tener una potencia instalada de cero.

5.1.2. Producción eléctrica

Una central eléctrica ideal podría producir electricidad ininterrumpidamente durante todo el año, sin embargo, en la realidad no producen la totalidad de la energía que podrían producir, sino que están supeditadas a ciertos factores dependiendo de cada tecnología.

De modo que conociendo la producción eléctrica de cada tecnología, como se muestra en la tabla 5.2, se podrá determinar el uso de cada central eléctrica.

Tabla 5.2: Producción eléctrica en la España peninsular en el año 2020 [67].

Producción eléctrica / GWh	2020
Hidráulica ¹	33 291
Eólica	53 775
Sola fotovoltaica	14 885
Solar térmica	4 538
Otras renovables ²	4 468
Residuos renovables	606
Generación renovable	108 818
Nuclear	55 757
Ciclo combinado	38 357
Carbón	4 800
Cogeneración ³	26 919
Residuos no renovables	1 895
Generación no renovable	130 474
Generación Total	239 292

¹ Hidráulica: incluye hidráulica y turbinación de bombeo.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

A partir de las tablas 5.1 y 5.2 se puede interpretar el bajo aprovechamiento de las energías renovables, puesto que son dependientes de factores climatológicos o geográficos; así como la gran utilización de la energía nuclear, que a pesar de no ser una de las primeras en potencia instalada es la energía con mayor presencia en cuanto a la producción eléctrica.

CAPÍTULO 5

También hay que destacar la baja utilización del ciclo combinado en España, y es que aun siendo una de las energías con mayor potencia instalada, no destaca en cuanto a la producción eléctrica. Esto se debe a un momento de auge de las centrales de ciclo combinado que generó un sobredimensionamiento de la construcción de estas plantas.

5.1.3. Estructura

La estructura del sistema eléctrico español puede expresarse desde dos puntos de vista, el respectivo a la potencia instalada y el de la producción eléctrica, de modo que juntos se pueda deducir las características del sistema eléctrico.

En las figuras 5.2 y 5.3 se representa la estructura de la potencia instalada y de producción eléctrica, respectivamente, del año 2020, de modo que expresa la transcendencia de cada tecnología.

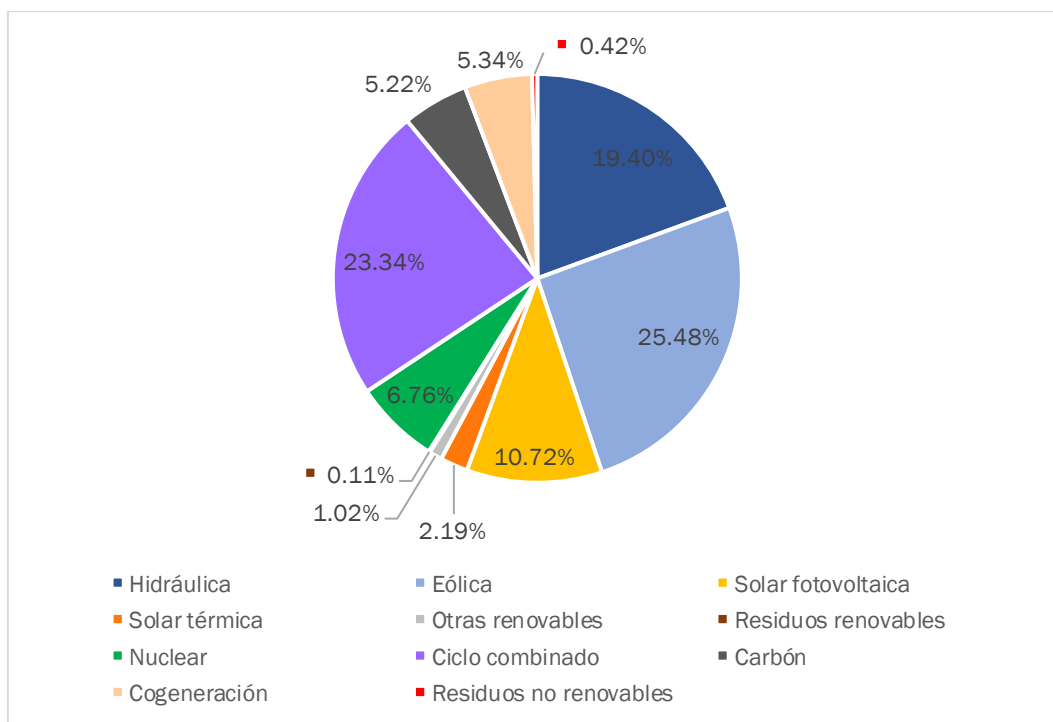


Figura 5.2: Gráfico de la estructura de potencia instalada en la España peninsular en el 2020 [67].

Estructura de la producción de energía eléctrica en España

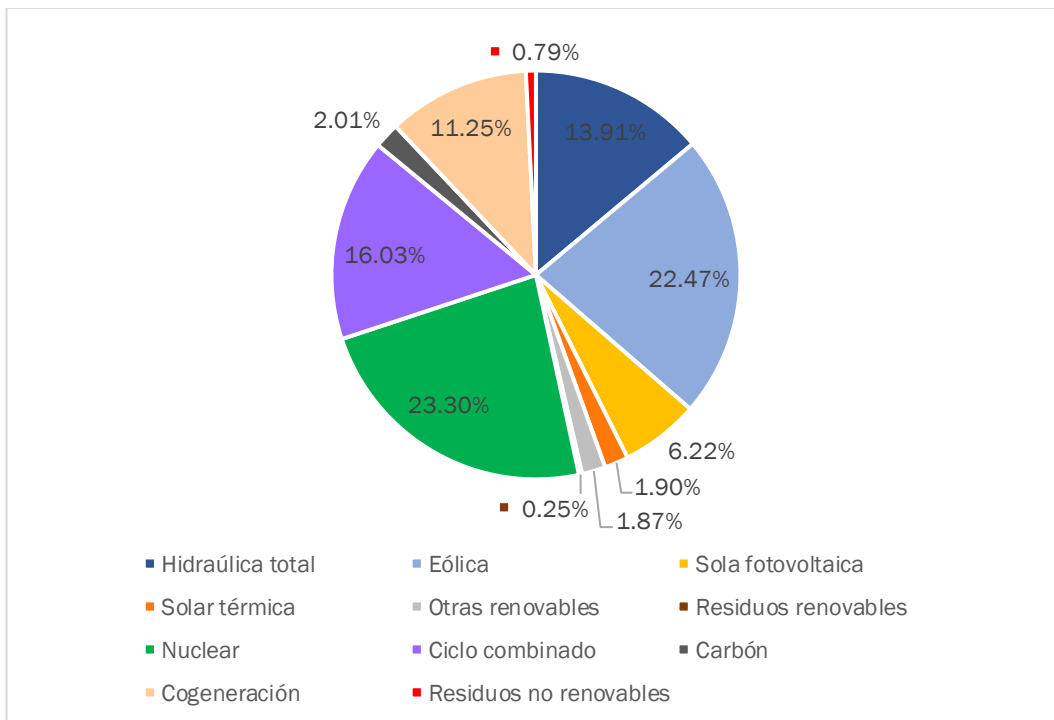


Figura 5.3: Gráfico de la estructura de la generación eléctrica en la España peninsular en el 2020 [67].

Siguiendo la misma filosofía anterior se podría pensar que la energía eólica, hidráulica y solar también estarían sobredimensionadas en potencia instalada, al igual que el ciclo combinado. Sin embargo, estas energías no están supeditadas a ningún combustible fósil, lo que genera una gran variabilidad. Estas energías dependen del viento, la lluvia y el sol, entre otros factores y no siempre están disponibles. Por lo tanto, estas energías tendrán un factor de utilización mucho menor que las energías no renovables.

Respecto al carbón, observamos la misma situación que para el ciclo combinado. Pese a ello no se ha producido un sobredimensionado como tal, sino que, a raíz del cierre progresivo de las centrales térmicas de carbón, como se ha comentado anteriormente, las centrales que quedan producen muy poca energía, hasta el cierre total de estas.

Generalmente la estructura de un sistema eléctrico se suele expresar por la estructura de generación eléctrica, puesto que se pueden deducir las emisiones de CO₂ a partir de ella. Interpretando la figura 5.3 se puede concluir que España tiene unos niveles bajos de emisiones de CO₂ a nivel mundial. Esto se explica porque la mayor transcendencia en generación eléctrica viene por parte de energías de bajas emisiones de GEI, como la hidráulica, la nuclear y la eólica.

5.2. Evolución histórica del sistema eléctrico de la España peninsular

Es importante conocer la evolución que ha tenido el sistema de producción de electricidad en España a lo largo de los años, para mostrar la transformación y el desarrollo de todos los tipos de tecnologías y a su vez señalar las claras evidencias de la preocupación de este país por el cumplimiento de los objetivos medioambientales.

5.2.1. Potencia instalada

A continuación, se va a mostrar en la figura 5.4 los datos recogidos de REE pertenecientes a la potencia instalada entre 1990 y 2020 en la España peninsular.

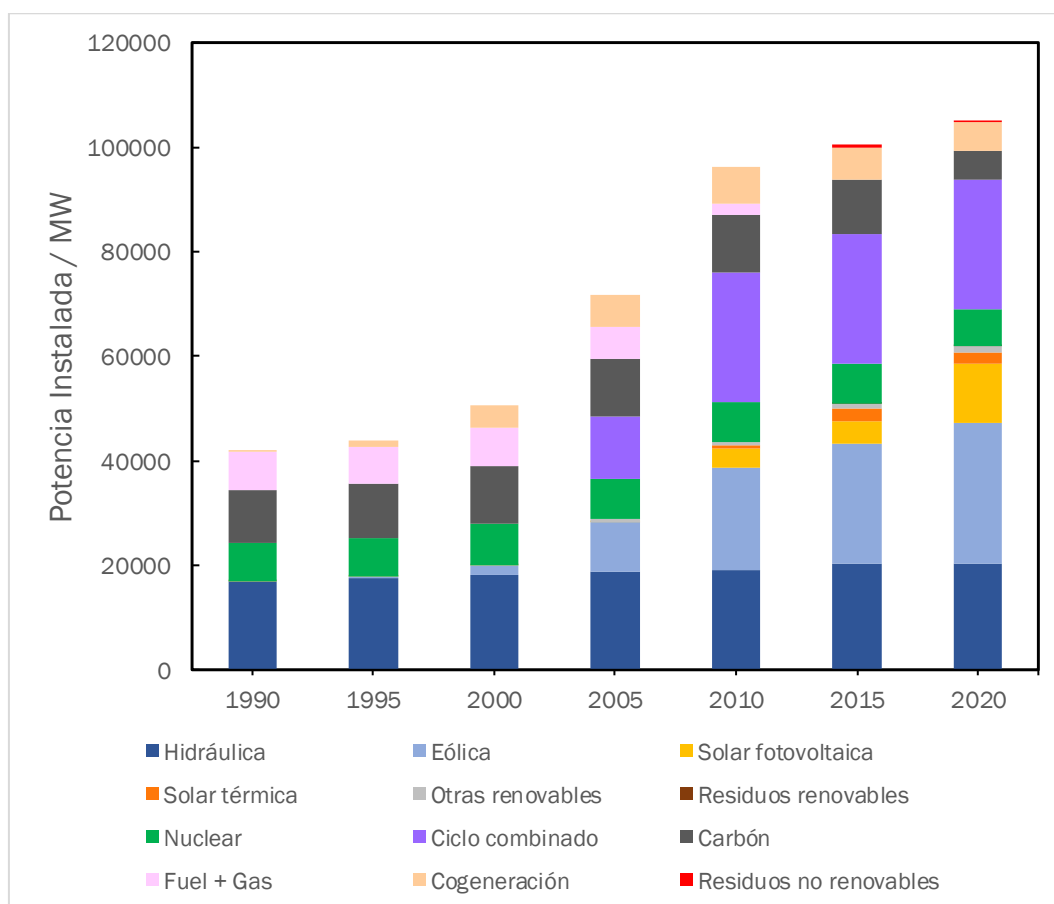


Figura 5.4: Gráfico de la potencia instalada en la España peninsular desde 1990 a 2020 [67].

En primera instancia, hay que destacar el cambio de potencia instalada global en España, pasando de 41 806 MW en 1990 a 71 865 MW en 2005 y hasta 105 244 MW en 2020. Esto se debe al crecimiento de la demanda eléctrica a lo largo de los años, ya que numerosos sectores han experimentado una transición al uso de energía eléctrica.

Llama la atención el gran cambio del ciclo combinado en tan sólo cinco años, aumentando su potencia instalada en un 107 %, de 11 992 MW en 2005 a 24 844 MW en 2010. A partir de este punto se produjo el sobredimensionado de potencia instalada en ciclo combinado del que se habló antes.

Respecto a los combustibles fósiles, las centrales de Fuel + Gas fueron completamente cerradas en el 2014, y las centrales térmicas de carbón han sufrido un gran cambio en 2020, disminuyendo un 40 % la potencia instalada respecto a 2019 hasta un valor de 5 492 MW en 2020.

En cambio, las energías renovables han experimentado un fuerte desarrollo. La energía eólica tuvo su mayor auge entre 2000 y 2010 donde se aumentó de forma constante la potencia instalada. Además, últimamente se sigue favoreciendo la instalación de esta energía con el fin de dejar de lado finalmente los combustibles fósiles. La energía solar fotovoltaica ha tenido una importantísima presencia durante estos últimos años, puesto que ha crecido desde 4 464 MW en 2018 a 8 665 MW en 2019 y, finalmente, hasta 11 276 MW en 2020, de forma que ha aumentado en un 152 % en tan sólo tres años.

5.2.2. Producción eléctrica

En la figura 5.5 se encuentran representados los datos de generación eléctrica recogidos en REE desde 1990 a 2020, de manera que se identifica la procedencia de la energía producida y se representa la demanda eléctrica española.

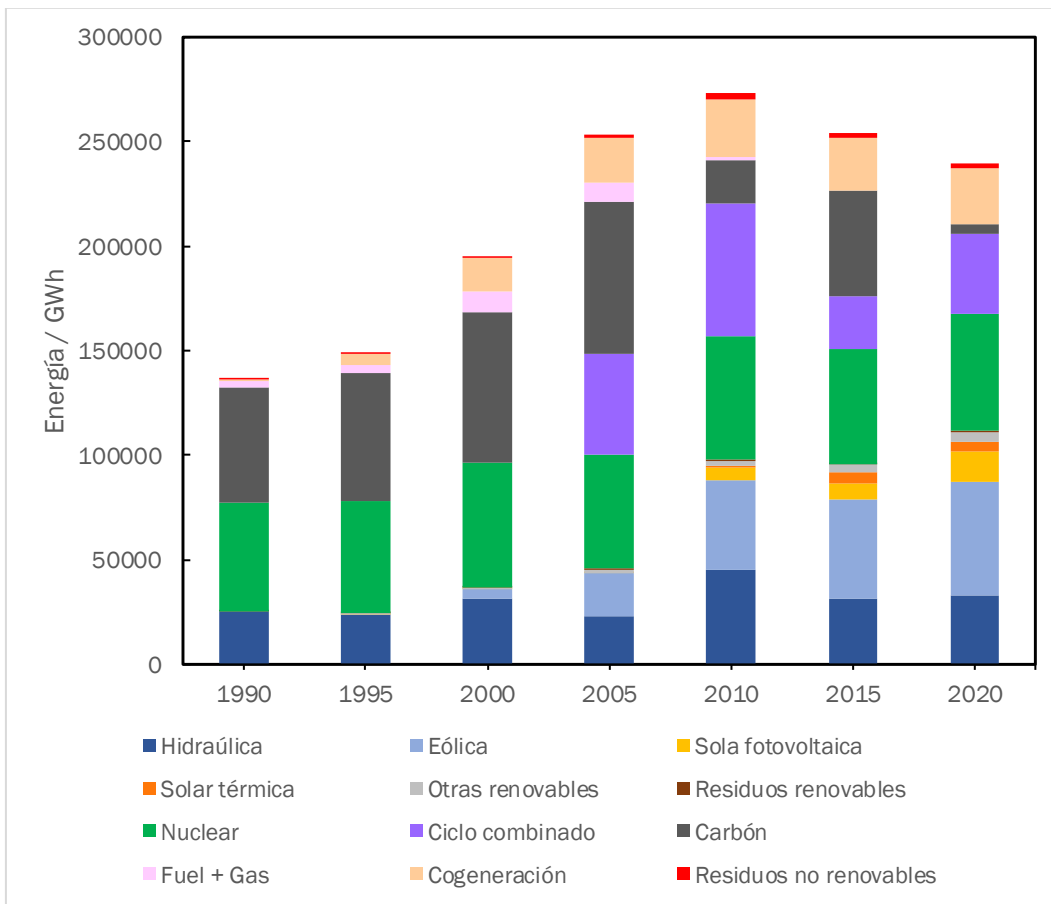


Figura 5.5: Gráfico de la generación eléctrica en la España peninsular desde 1990 a 2020 [67].

Hidráulica: incluye hidráulica y turbinación de bombeo.

Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

En 2010 la producción eléctrica tuvo su pico histórico con 273 360 GWh producidos. A pesar de que en los años siguientes no se han alcanzado esas cifras, la comparación con el año 1990 o incluso el 2000 muestra un claro crecimiento de la energía eléctrica.

En la figura 5.5 destaca la caída del 60 % de la producción procedente del ciclo combinado entre 2010 y 2015, pasando de 62 954 GWh en 2010 a 25 034 GWh en 2015. Este hecho coincide con lo que muestra la figura 5.4 donde se produjo demasiada instalación de potencia, generando que hubiera más centrales de las que se podían aprovechar. También concuerda con anteriormente comentado del carbón puesto que la generación eléctrica procedente de este combustible fósil se ha reducido mucho en 2020.

De igual manera destaca el crecimiento en un 68 % de la energía solar fotovoltaica entre 2019 y 2020, debido al aumento de la potencia instalada de

este tipo, figura 5.4, tal y como se comentó anteriormente. También experimentó un gran crecimiento la energía eólica entre 2005 y 2010, pasando de producir 20 857 GWh a producir 43 208 GWh; de igual manera se debe a la instalación de potencia.

5.2.3. Estructura

La estructura general del sistema eléctrico español se va a representar a través de la estructura de potencia instalada en porcentaje respecto del total, figura 5.6, y la estructura de generación eléctrica también de manera porcentual, figura 5.7, para contextualizar el sistema de una manera más eficaz.

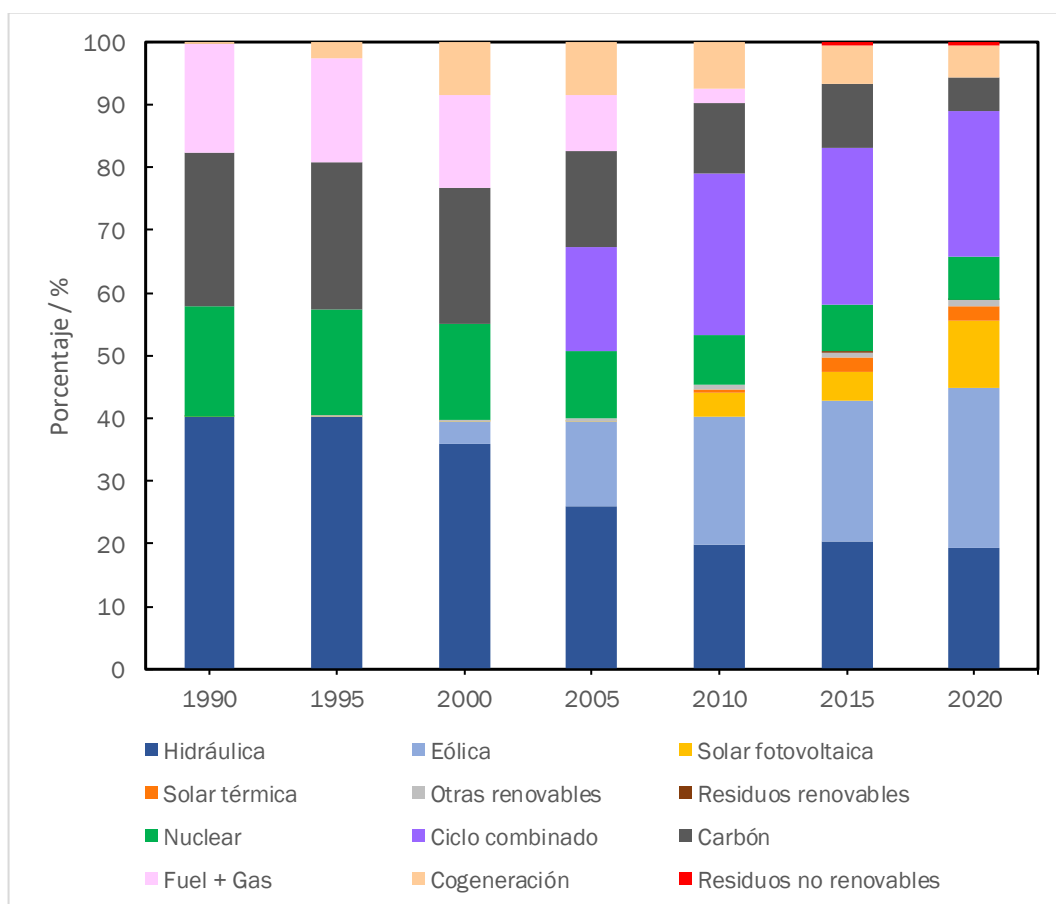


Figura 5.6: Gráfica de la estructura de potencia instalada en la España peninsular desde 1990 a 2020 [67].

Observando la figura 5.6 es importante entender que, en primer lugar, llama la atención la gran trascendencia de la energía hidráulica en 1990 y 1995 en comparación con otros años, sin embargo, anteriormente se ha comentado que la potencia instalada ha aumentado mucho desde esos años; esto se debe a la inclusión y desarrollo de más tecnologías de producción de electricidad a partir de esos años, como la energía eólica, la solar y la cogeneración. En segundo lugar, ocurre lo mismo para el caso de la energía

CAPÍTULO 5

nuclear, puesto que hay una notoria bajada del porcentaje sin afectar a la producción eléctrica, apreciable en la figura 5.7; este hecho también explica el aumento de la generación eléctrica a lo largo de los años.

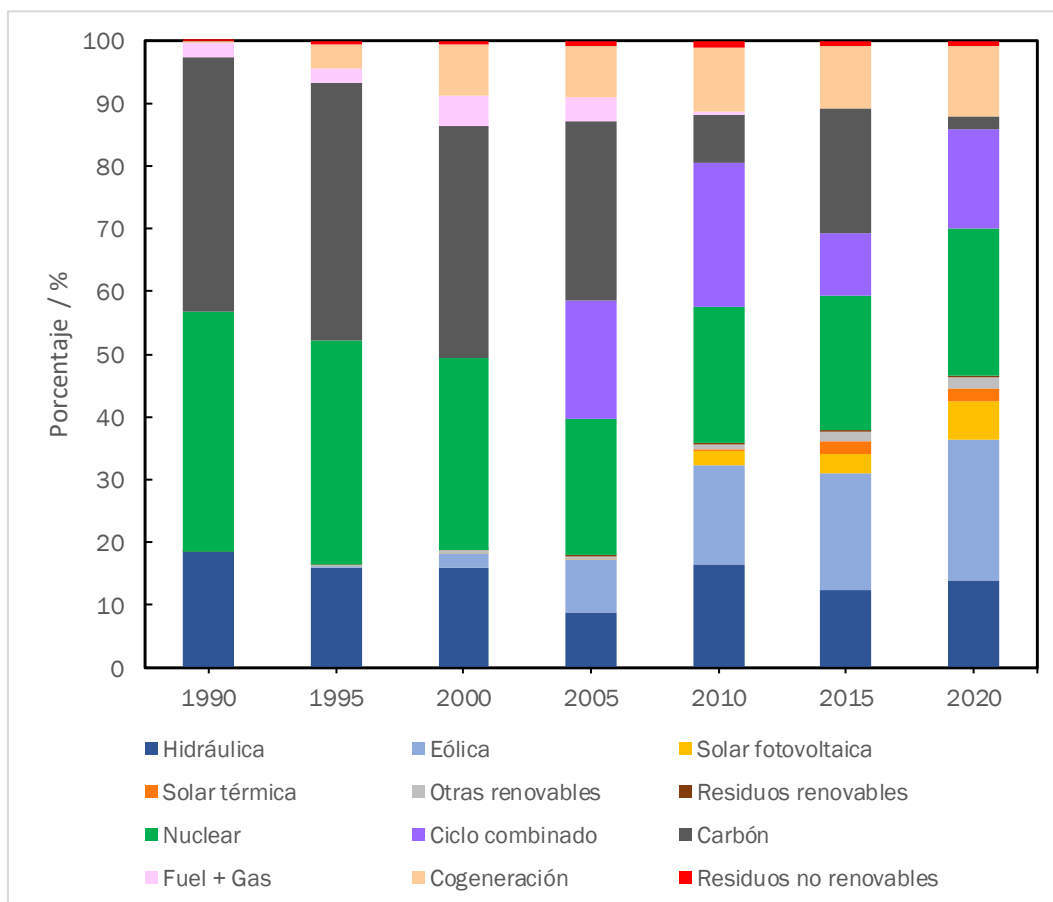


Figura 5.7: Gráfica de la estructura de generación eléctrica en la España peninsular desde 1990 a 2020 [67].

Analizando la figura 5.7 se puede deducir de manera simple la inclusión de nuevas tecnologías, junto con el gran aumento de la producción eléctrica, tal y como se concluyó de la figura 5.5.

Comparando ambas figuras 5.6 y 5.7, se puede ver la práctica desaparición de la energía procedente de combustible Fuel + Gas (en el año 2010 hay una potencia instalada correspondiente a un 2.23 %, pero ese mismo año la producción de esta fuente de energía tan sólo generó un 0.57 % de la energía eléctrica, lo que quiere decir que había centrales activas que no generaban ningún tipo de electricidad). Del mismo modo que el Fuel + Gas, se ve el abandono gradual del carbón en el sistema eléctrico, con una gran bajada de generación eléctrica en el año 2010. Después se recuperó, para finalmente acabar de forma escalonada en el año 2020, donde a pesar de haber un 5 % de potencia instalada la generación es de tan solo el 2 %.

Al contrario que en el apartado anterior, analizando las figuras 5.6 y 5.7 no se puede concluir tan fácilmente si el factor de utilización de cada energía ha experimentado un aumento o una disminución. Esto se debe a que hay que contextualizar cada año con la generación total de energía, ya que, una energía puede tener un menor porcentaje de un año a otro, pero tener la misma potencia instalada.

5.3. Cálculo de factores de utilización. Límites y condicionantes

5.3.1. Factor de utilización

Con anterioridad se han dado unos matices de qué es el factor de utilización, pero en este apartado se detallará completamente. También se puede llamar factor de capacidad.

En primer lugar, se debe diferenciar entre capacidad de generación eléctrica y factor de capacidad, ya que se pueden llegar a malinterpretar. Capacidad de generación eléctrica se refiere a la producción eléctrica máxima que un generador puede llegar a producir. Cada central eléctrica tiene una capacidad nominal, equivalente a lo que en el trabajo se ha denominado como potencia instalada, que indica la producción máxima que ese generador puede producir a plena potencia continua.

El factor de capacidad es la relación entre la energía que una central de generación es capaz de generar a máxima potencia y la producción real de esa instalación durante un periodo de tiempo. Es importante tener presente esta diferencia en todo momento, dado que la producción de un generador puede variar en función de los problemas de mantenimiento, condiciones meteorológicas, coste del combustible, etc.

Cabe destacar que los factores de capacidad o de utilización de las energías renovables son significativamente menores que el de las centrales nucleares, de carbón u otras de uso de combustibles fósiles, a causa de la variabilidad de las renovables [12].

Seguidamente, en la figura 5.8 se exponen los factores de utilización de cada una de las tecnologías de producción de energía eléctrica, calculados a partir de los datos de producción de energía eléctrica y potencia instalada en la España peninsular, para los años 1990, 1995, ..., y 2020, disponibles en la página web de REE. El factor de utilización (FU) de cada tecnología, para cada uno de los años considerados, se calcula con la siguiente ecuación:

$$FU = \frac{\text{Energía producida año } i / \text{GWh}}{\text{Potencia instalada año } i / \text{MW}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{8760 \text{ horas}} \cdot \frac{1000 \text{ MW}}{1 \text{ GWh}} \quad (5.1)$$

CAPÍTULO 5

De los valores obtenidos del factor de utilización para cada tecnología a lo largo de los años se puedan inferir unas conclusiones de la evolución de cada fuente de energía en España.

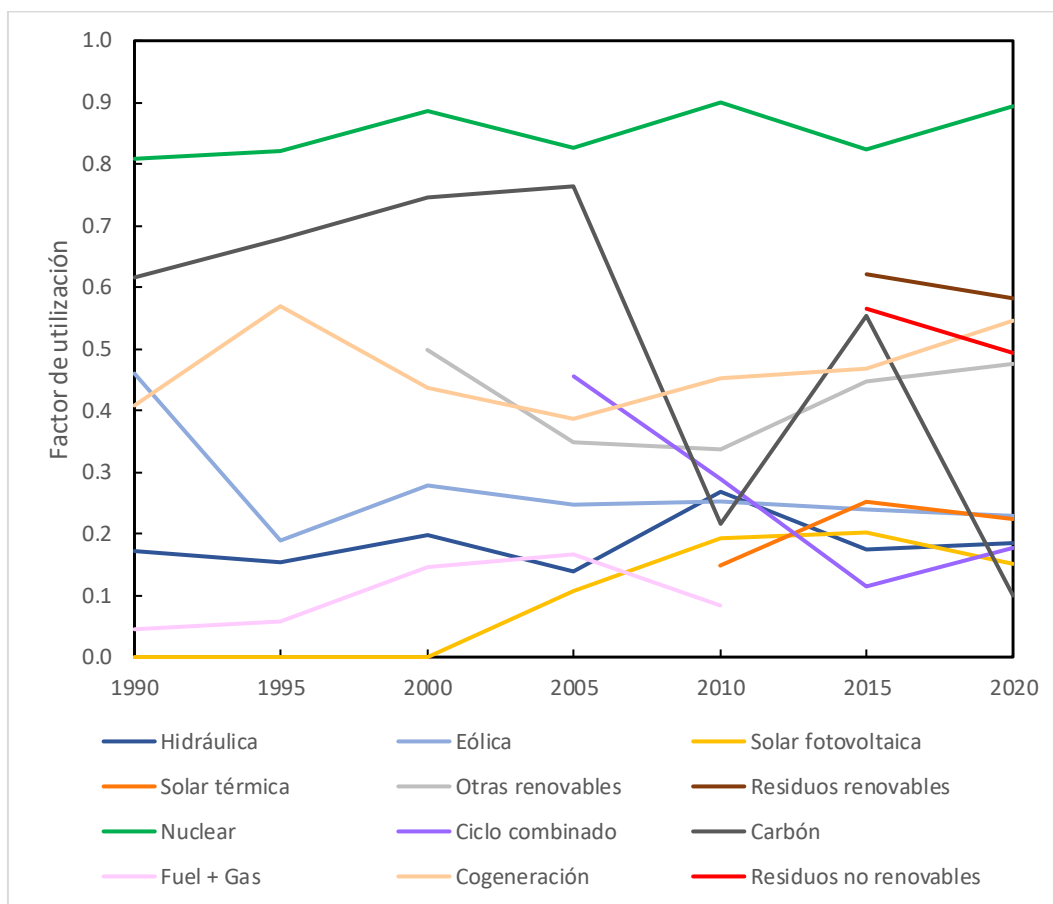


Figura 5.8: Gráfica del factor de capacidad de las tecnologías en la España peninsular desde 1990 a 2020 [67].

A partir de la figura 5.8 se puede inferir información sobre cada una de las tecnologías descritas.

Como se muestra la nuclear tiene un factor de utilización muy elevado (entre 0.8 y 0.9) y constante a lo largo de los años. La térmica de carbón tiene valores de FU altos, como es habitual en estos tipos de centrales, pero ha bajado de forma muy significativa en los últimos 15 años, hasta valores menores de 0.1. lo que se traduce en que las centrales de carbón están prácticamente inactivas.

Las centrales de ciclo combinado han tenido siempre valores más bajos de lo que cabría esperar de este tipo de tecnología, debido al sobredimensionado de parques de este tipo, con los años ha ido bajando, salvo

en los últimos 5 años que ha subido ligeramente, en parte debido a la sustitución de las centrales de carbón cerradas.

Dentro de las energías renovables, como son la energía hidráulica, la energía eólica y las energías solares, se puede observar que tienen bastante variabilidad a lo largo de los años. En primer lugar, la energía eólica en el 1990 tiene un alto FU, debido a que había poca potencia instalada y se generaba gran cantidad de energía con ella, en segundo lugar, la energía hidráulica se ha mantenido constante a lo largo de los años dependiendo siempre de las precipitaciones que haya en ese año, también destacar que la energía solar térmica comenzó a implementarse en 2010 tiende a ser constante como las demás energías renovables. Finalmente, la energía solar fotovoltaica ya en 1990, 1995 y 2000 había potencia instalada en España, pero era ínfima y se producía muy poca energía, de ahí el FU nulo.

5.3.2. Límites y condicionantes

Como se comentó al principio de este apartado, la generación eléctrica no se corresponde con la capacidad nominal de cada tecnología, puesto que cada una de ellas tienen unos límites y unos condicionantes que provocan que no se aproveche del todo la potencia.

Todas las tecnologías están entre unos límites de factores de capacidad, en alguna de ellas esos límites son más flexibles que en otras. Por ejemplo, la energía hidráulica está condicionada a la lluvia y a la época del año, esto genera que en años de sequías, halla un menor factor de utilización.

Con respecto a la figura 5.8 de las tecnologías renovables la mayor parte de ellas están dentro de los límites que se detallaron en el apartado 3.9 de la memoria en el caso de la solar, que se encuentran entre 15 % y 20 %. Tanto la solar fotovoltaica como la térmica tienen una media de 18.1 % y 22.7 % respectivamente, lo que es muy parecido a la media establecida en el capítulo 3. La energía eólica tiene un gran límite de factor de utilización puesto que es muy dependiente del lugar geográfico en el que se instala, comprobándose que, en España, excepto en el año 1990, tiende a estar en torno al 25 % de factor de capacidad. Es la energía hidráulica la única que tiene un menor factor de utilización que la media citada en el capítulo 3, esto se debe a que España es un país con una baja pluviosidad, donde los ríos tienen poco caudal, con poca regularidad, épocas de sequía... lo que supone una menor generación eléctrica y por consiguiente un menor FU.

Basándose en la figura 5.9 y en el apartado 3.9 de la memoria se pueden comparar los límites de los factores de las tecnologías no renovables con los datos entre 1990 y 2020. Lo más destacado es, sin lugar a dudas, es el bajísimo factor de utilización del ciclo combinado, teniendo un límite inferior

del 40 %, esto se debe al sobredimensionado de la capacidad instalada ya comentado, que se produjo entre 2005 y 2010, por ello el factor de utilización de esta tecnología para el año 2005 sí estuvo dentro de los límites.

Además, fácilmente se comprueba que la energía nuclear se encuentra entre un (80 – 90) % de factor de utilización, lo que concuerda con los límites de la tecnología y también se corrobora, otra vez más, la caída que ha sufrido el carbón en los últimos años con el objetivo final de la descarbonización.

5.4. Cálculo del factor de emisiones de CO₂ equivalente global y por tecnología

El factor de emisiones se define como un valor representativo que pretende relacionar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión contaminante. En el caso de la generación eléctrica estos factores son normalmente expresados en toneladas de contaminante entre la producción de energía anual de cada tecnología. Hay que destacar que este trabajo se centrará en el CO₂ como contaminante.

Los factores de emisión dan una idea del daño que provoca en la atmósfera el uso de una determinada tecnología para la producción eléctrica y permite hacer una comparación entre ellas, determinando la viabilidad medioambiental de cada una.

5.4.1. Factores de emisiones de CO₂ equivalente por tecnología

A continuación, en la tabla 5.3 se van a exponer los datos de los factores de emisiones de CO₂ equivalente (FE) para las distintas tecnologías antes tratadas, según cada una de las metodologías.

Parte de ellos han sido extraídos de la bibliografía, como es el caso de las energías eólica, hidráulica, ambas solares, la energía nuclear, los residuos renovables y las determinadas como ‘Otras renovables’ dentro de las que se encuentran la biomasa y el biogás entre otros. También se muestran factores para otras energías los cuales han sido calculados a partir de los datos de generación eléctrica y de las emisiones asociadas a la generación eléctrica de cada tecnología, los cuales se encuentran en la página web de Red Eléctrica Española. El factor de emisión (FE) de cada tecnología, para cada uno de los años considerados, ha sido calculado con la siguiente ecuación:

$$FE = \frac{\text{Emisiones asociadas a generación año } i / \text{tCO}_2}{\text{Energía producida año } i / \text{GWh}} \cdot \frac{1000 \text{ GWh}}{1 \text{ MWh}} \quad (5.2)$$

Además, cabe resaltar que el factor de emisiones se puede obtener de distintas maneras, dependiendo del método de cálculo de las emisiones asociadas a cada tecnologías, tal y como se ha explicado en el apartado 4.3:

Metodología REE: únicamente tiene en cuenta las emisiones de las energías fósiles, por lo que se ha aplicado la ecuación 5.2 a los datos de emisiones y energía producida, obteniéndose un factor de emisión para cada año, a la hora de realizar los cálculos con este factores se ha tomado un valor promedio de todos los años, mostrado en la tabla 5.3.

Metodología LCA: solamente considera las emisiones de las energías no fósiles, de las cuales se ha obtenido el factor de emisiones de la bibliografía. Esta metodología no es aplicable puesto que las energías fósiles suponen la mayor parte de las emisiones producidas y al utilizar esta metodología no se presenta fiel a la realidad.

Metodología LCA extra: esta metodología tiene en cuenta las emisiones de las energías no fósiles del mismo modo que la metodología LCA, sin embargo, se considera las emisiones indirectas de las energías fósiles como una estimación de un 10 % de las emisiones producidas cada año, de modo que a partir de estas emisiones se ha obtenido un factor para cada año y al igual que en la metodología REE se ha utilizado un valor promedio.

CAPÍTULO 5

Tabla 5.3: Factores de emisiones de CO₂ equivalente en la España peninsular según cada metodología [12], [67].

FACTOR DE EMISIÓN (tCO ₂ -eq-MWh ⁻¹)			
Metodología	REE	LCA	LCA extra
Hidráulica ¹	0.000	0.020	0.020
Eólica	0.000	0.016	0.016
Solar fotovoltaica	0.000	0.036	0.036
Solar térmica	0.000	0.040	0.040
Otras renovables ²	0.000	0.060	0.060
Residuos renovables	0.000	0.024	0.024
Nuclear	0.000	0.022	0.022
Ciclo combinado	0.370	- ⁴	0.407
Carbón	0.950	- ⁴	0.999
Fuel + Gas	0.700	- ⁴	0.770
Cogeneración ³	0.380	- ⁴	0.417
Residuos no renovables	0.240	- ⁴	0.273

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

⁴ Dato no disponible para esta metodología.

Tal y como se explicó anteriormente la metodología seguida por la Red Eléctrica Española únicamente tiene en cuenta las emisiones directas de CO₂-eq, por lo que considera nulos los factores de emisión de las energías no fósiles, como se muestra en la tabla 5.3.

Destaca por encima de todas las tecnologías el carbón que, sin lugar a duda, es la tecnología más contaminante de las consideradas. De ahí el cierre prioritario de este tipo de centrales, ya que son las más perjudiciales para el medioambiente. El factor de emisiones del ciclo combinado, la cogeneración y los residuos no renovables son mucho más comedidos. Es por ello por lo que se está tratando de hacer una transición la energía procedente del carbón a estas tecnologías, principalmente a la cogeneración y al ciclo combinado, además de hacia las energías renovables.

También hay que mencionar que el factor del Fuel + Gas se redujo a cero en el año 2011, ya que se abandonó totalmente, de manera contraria, el ciclo combinado comenzó a partir del año 2011, estableciéndose en el factor

mostrado en la tabla 5.3. Además, los residuos no renovables experimentaron en 2020 un aumento del factor de emisiones hasta llegar a 0.360.

Respecto a la metodología LCA, se debe mencionar que el estudio del que se obtuvieron los datos únicamente tenía algunas de las tecnologías detalladas en la tabla 5.3. Sin embargo, también se puede extrapolar esta metodología a las tecnologías basadas en combustibles fósiles de la metodología REE.

Los valores tomados en la tabla 5.3 para la metodología LCA se suponen constante para todos los años tratados, debido a que no existen datos recabados para la España peninsular de las emisiones de CO₂-eq siguiendo este tipo de metodología. De este modo, se podrían obtener las emisiones de cada tipo de tecnología de esta metodología en función de los factores de emisión.

Se debe destacar sobre todo el bajo factor de emisiones que tienen este tipo de tecnologías, inferior a 0.060 tCO₂-eq-MWh⁻¹.

Finalmente, la metodología LCA extra considera de igual modo el factor de emisión de las energías renovables al igual que en la metodología anterior, pero para las energías no renovables se presenta un aumento sustancial de los factores de emisión, esto hecho es una muestra de que la metodología de la Red Eléctrica Española no tiene en cuenta ciertas emisiones producidas que pueden llegar a suponer una cantidad importante de CO₂ equivalente.

5.4.2. Factor de emisiones de CO₂ equivalente global

El factor de emisiones de CO₂-eq global se puede definir como un valor representativo de las emisiones de CO₂-eq emitidas en un país según la energía producida por todas las tecnologías. Este factor es expresado como el cociente entre todas las emisiones asociadas a la generación eléctrica entre la generación eléctrica del país.

De la misma forma que antes, el factor de emisiones de CO₂-eq global se puede expresar en función de varias metodologías, considerando o no las emisiones indirectas de las tecnologías, tal y como se representa en la tabla 5.3.

En la tabla 5.4 se representa el valor de los factores de emisión global para la España peninsular desde el año 1990 hasta 2020, en intervalos de 5 años, calculados mediante las metodologías REE, LCA y LCA extra, ya descritas. El cálculo de este factor global se ha realizado a partir de las emisiones asociadas a la generación eléctrica y la generación eléctrica global de cada año, sin distinción por tecnología. De modo que se ha utilizado la ecuación 5.2 para el cálculo del factor de emisión global.

CAPÍTULO 5

Dependiendo de cada una de las metodologías se ha utilizado unas determinadas emisiones para el cálculo del factor global, en el caso de la metodología REE se han tomado únicamente las emisiones de las energías no renovables como emisiones globales producidas por cada año, para el caso de la metodología LCA se ha tenido en cuenta las energías no fósiles, pero además se ha debido tener en cuenta las emisiones de las energías no renovables, puesto que en el caso de no hacerlo esta metodología no describiría lo ocurrido en la España peninsular, finalmente, en el caso de la metodología LCA extra se han tenido en cuenta las emisiones asociadas a las energías renovables, al igual que en la metodología LCA, y también se han utilizado las emisiones de las energías no renovables sumando el 10 % de las emisiones anuales, de manera que suponga una aproximación de las emisiones indirecta que no considera la metodología REE.

Tabla 5.4: Factor de emisiones de CO₂ equivalente global en la España peninsular desde 1990 a 2020 según los distintos tipos de metodologías [12], [67].

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Metodología REE	0.403	0.423	0.418	0.402	0.202	0.266	0.123
Metodología LCA	0.414	0.433	0.428	0.410	0.214	0.279	0.139
Metodología LCA extra	0.455	0.476	0.470	0.450	0.234	0.305	0.151

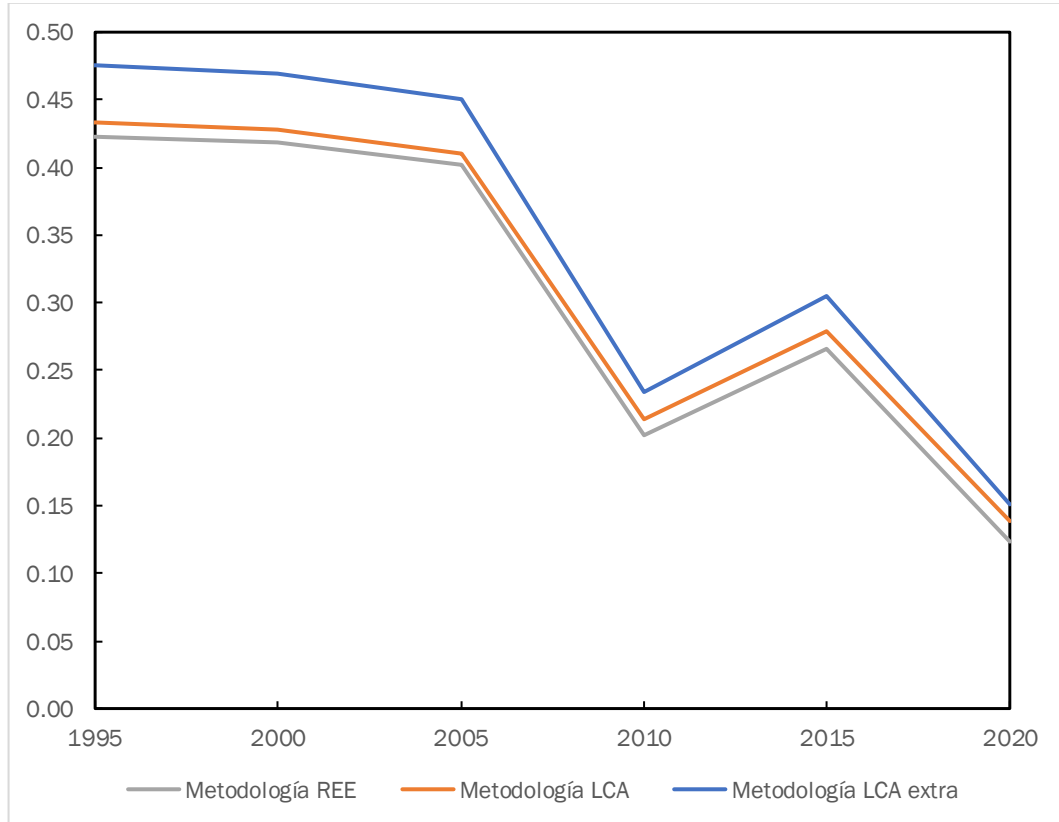


Figura 5.9: Gráfica del factor de emisiones de CO₂ equivalente global en la España peninsular desde 1990 a 2020 según los distintos tipos de metodologías [12], [67].

A partir de la tabla 5.4 se puede demostrar que es más exacta utilizar la metodología que tiene en cuenta todo el ciclo de vida para todas las tecnologías, puesto que se aproxima más a la realidad. Si se utilizara este tipo de metodología a la hora de tomar medidas para cumplir los objetivos europeos, los datos serían mucho más fiables.

Además, la figura 5.9 da una visión más gráfica de la importante disminución que ha experimentado el factor de emisiones global en los últimos 20 años con cada una de las metodologías, además se aprecia que a lo largo de los años la metodología LCA extra ha evolucionado y no supone un gran distanciamiento de las otras metodologías como se puede apreciar en los años 1990 y 1995.

6. Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tras los anteriores capítulos que han servido para describir la situación y el contexto del sistema eléctrico español actual, a continuación, se realizará un análisis de distintos escenarios futuros para determinar cómo se podrían alcanzar los objetivos determinados por la UE de cara a la descarbonización.

6.1. Objetivos de la UE y de España

El cambio climático y la degradación del medio ambiente son una gran amenaza para nuestro planeta, de modo que para mitigar estos efectos, Europa ha creado el llamado “*European Green Deal*” o Pacto Verde Europeo en español, que supone una hoja de ruta para dotar a la UE de una economía sostenible aspirando a ser climáticamente neutra en 2050. Este pacto establece un plan de acción para impulsar el uso eficiente de los recursos mediante la transición a una economía limpia y circular, restaurando la biodiversidad y reduciendo la contaminación [73].

Siguiendo esta hoja de ruta, la UE ha fijado unos objetivos para reducir progresivamente sus emisiones de GEI hasta 2050, los cuales se detallan seguidamente.

6.1.1. Medidas sobre clima y energía hasta 2020

Los objetivos fundamentales de cara a 2020 eran cuatro:

- 20 % de reducción de las emisiones de GEI en relación a los niveles de 1990.
- 20 % de energías renovables en la UE.
- 20 % de mejora de la eficiencia energética.
- 10 % de interconexiones eléctricas [74], [75].

6.1.2. Marcos sobre clima y energía para 2030

En septiembre de 2020 la Comisión Europea propuso elevar el objetivo de reducción de emisiones de GEI para 2030 hasta al menos el 55 % con respecto a 1990, que anteriormente estaba en 40 %, siendo a finales de 2020 aprobada esta propuesta [76]. De modo que los objetivos para 2030 son:

- 55 % de reducción de las emisiones de GEI respecto a 1990.
- Al menos un 32 % de cuota de energías renovables.
- Al menos un 32.5 % de mejora de la eficiencia energética.
- 15 % de interconexiones eléctricas [74], [77].

Además de estos objetivos, los estados miembros tienen la obligación de elaborar estrategias nacionales a largo plazo, garantizando así la coherencia

entre dichas estrategias y sus planes nacionales de clima y energía. De modo que, para el caso específico de España, se consideran los siguientes objetivos:

- 42 % de energías renovables sobre el consumo total de energía final.
- 39.5 % de mejora de la eficiencia energética.
- 74 % de energías renovables en la generación eléctrica [78].

6.1.3. Horizonte 2050

En 2018, a través de la Comunicación de la Comisión Europea sobre “Un planeta limpio para todos. La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra” y de la propuesta de la Comisión de marzo de 2020 de la Ley del clima Europea se establece en el marco para alcanzar la neutralidad climática de la UE en 2050 [79], lo que supone uno de los objetivos propuestos por la UE. La configuración del sistema eléctrico en el año 2050 será altamente dependiente de los futuros desarrollos tecnológicos, de los objetivos y compromisos asumidos en el ámbito de una transición hacia una descarbonización, de la aparición de nuevos modelos de negocio y de la creciente concienciación social [80].

6.1.4. Conclusiones de los objetivos

Finalmente, es importante tener en cuenta que todos estos objetivos de la UE son efectivos a la energía final y no específicamente en la generación de electricidad que es donde se ha centrado este trabajo. Por lo tanto, como objetivo a cumplir únicamente se tomará el objetivo para 2030 en España de 74 % de energías renovables en la generación eléctrica y en base a ese objetivo se detallará la reducción de emisiones respecto a 1990.

6.2. Metodología

A la hora de analizar el impacto de distintos escenarios futuros se ha adoptado la siguiente metodología: el trabajo se ha centrado en el sistema eléctrico español únicamente teniendo en cuenta las series históricas de datos de potencia instalada, generación eléctrica y emisiones de CO₂ recogidas en REE. En base a esos datos se han analizado distintos escenarios futuros partiendo de ciertas hipótesis. A la hora de realizar la predicción de energía demandada en 2030 y 2050 se ha tenido en cuenta por un lado que la demanda disminuirá conforme aumente el rendimiento de los procesos energéticos, pero por otro lado aumentará debido a la transición de algunos sectores dependientes de recursos fósiles al sector eléctrico, en vías de utilizar energía verde. Por ejemplo, en el caso del transporte, ya es una realidad que se ha empezado a desplazar al sector eléctrico. De manera global se ha

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

estimado que en 2030 la generación deberá ser un 10 % mayor a la generación de 2020 y, en el caso de 2050, deberá ser un 30 % mayor que la generación de 2030. Aparte de esta hipótesis de partida, se toma como objetivo el 74 % de energías renovables en la producción de energía eléctrica para 2030 y el 100 % para 2050. A continuación, en la tabla 6.1 se muestran los valores de demanda de energía eléctrica que se deberán satisfacer cada año.

Tabla 6.1: Demanda eléctrica estimada para 2030 y 2050.

DEMANDA ELÉCTRICA / GWh	
2030	271 828
2050	353 377

Además, también se han calculado las emisiones de CO₂-eq emitidas en cada escenario. Para ello se han tomado como referencia los factores de emisiones medios de cada tecnología calculados a partir de las series de datos históricas. Estos valores se van a tomar como constantes, ya que se ha visto que no varían mucho de un año a otro. Aunque se podría tomar un escenario en el que hubiera avances en las tecnologías y el factor de emisiones disminuyera, en este trabajo no se considerará. En la tabla 6.2 se muestran los factores de emisión para cada una de las tecnologías con las que se ha trabajado.

Tabla 6.2: Factores de emisión para cada tecnología utilizados en la predicción [12].

FACTOR DE EMISIÓN / tCO ₂ -eq·MWh ⁻¹	
Hidráulica ¹	0.020
Eólica	0.016
Solar fotovoltaica	0.036
Solar térmica	0.040
Otras renovables ²	0.060
Residuos renovables	0.024
Nuclear	0.022
Ciclo combinado	0.370
Carbón	0.953
Cogeneración ³	0.379
Residuos no renovables	0.248

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Los factores de emisión de las siguientes tecnologías: carbón, ciclo combinado, cogeneración y residuos no renovables, han sido calculados a partir del análisis de los datos de la web de REE

Los valores de emisiones de CO₂ equivalente presentados en cada uno de los distintos escenarios han sido calculados a partir de dos metodologías distintas, descritas anteriormente, la metodología REE y la metodología LCA para todas las tecnologías:

- **Metodología REE:** Únicamente considera las emisiones directas en la producción de energía, por lo tanto, no tiene en cuenta las energías libres de combustibles fósiles, como la energía nuclear, eólica, etc.
- **Metodología LCA extra:** Esta metodología incluye todo el ciclo de vida de la planta, por lo tanto, tiene en cuenta emisiones indirectas, como la construcción de la planta o el desmantelamiento. Hay que destacar que esta metodología ha sido aplicada a las tecnologías fósiles, aunque debido a la no disponibilidad de datos se ha supuesto que las emisiones indirectas suponen un 10% de las emisiones totales de cada

energía. Por lo que se ha sumado ese 10% a las emisiones obtenidas para cada año en la predicción.

6.3. Análisis de escenarios futuros

En el análisis de los distintos escenarios en la producción de energía eléctrica en España se han utilizado valores estimados del factor de utilización de cada tecnología, así como de la potencia instalada, para estimar las emisiones, obteniéndose como resultados la generación eléctrica y su estructura. El cambio en la potencia instalada se puede traducir en la construcción, ampliación o cierre de centrales eléctricas de cada tipo.

Seguidamente se expondrán cada uno de los escenarios tomados para el cumplimiento de los objetivos impuestos tanto por la UE como por España. Cada uno de los escenarios están divididos en función de la potencia instalada, el factor de utilización, las emisiones obtenidas, la generación eléctrica y la estructura, de manera que se detallen los cambios obtenidos y la razón del cambio de la potencia instalada o el factor de utilización.

A modo de resumen a continuación se muestran las hipótesis establecidas en cada uno de los escenarios, que se describirán con mayor detalle en los apartados siguientes.

Escenario 1: se utiliza una hipótesis en la que las centrales nucleares en 2030 han sido clausuradas a excepción de 3 de ellas, además de una importante implicación del ciclo combinado y en menor medida de la cogeneración.

Escenario 2: se ha supuesto que las centrales nucleares han visto renovadas sus licencias y todas ellas siguen en activo en 2030, sin ningún tipo de apoyo por parte de otras energías no renovables.

Escenario 3: se ha supuesto que las centrales nucleares han visto renovadas sus licencias y todas ellas siguen en activo en 2030, sin embargo, se presenta un pequeño apoyo con el ciclo combinado y la cogeneración.

6.3.1. Escenario 1

Comenzando por el año 2030 y más concretamente por las energías no renovables, en este escenario se ha considerado que en 2030 la energía nuclear solamente estará representada por las centrales de Cofrentes, Vandellós II y Trillo [81], cada una de ellas con su potencia instalada [82]. Por lo tanto, únicamente quedarán 3 245 MW de potencia instalada de energía nuclear. Este recorte en la energía nuclear implicará que las energías como el

CAPÍTULO 6

ciclo combinado o la cogeneración no se abandonen totalmente, de hecho, en el caso del ciclo combinado la reducción será escasa.

Por otra parte, las energías renovables deberán experimentar un gran desarrollo en esos 10 años. En el caso de la energía hidráulica se obtendrá un aumento del 50% de la potencia instalada respecto 2020, gran parte de ello debido a la instalación de centrales de bombeo. La energía eólica se ha estimado que ganará mucha presencia a causa del desarrollo de la eólica offshore. De igual manera la energía fotovoltaica también se ha estimado que comenzará a usar plantas en alta mar.

Respecto a 2050, se estima que se mantenga un crecimiento progresivo respecto a las energías renovables, consiguiéndose el objetivo de no ser dependientes de las energías basadas en combustibles fósiles. Para ello se estima que los factores de utilización de las energías renovables aumenten como consecuencia de los avances tecnológicos en la producción renovable de energía eléctrica.

6.3.1.1. Potencia instalada y factor de utilización

Seguidamente en la tabla 6.3 se muestra la distribución de la estimación de la potencia instalada tanto para 2030 como para 2050 en el primer escenario para cada tecnología. Y en la tabla 6.4 el factor de utilización que se utilizará para obtener los resultados de la estimación realizada. Se ha considerado que los factores de utilización para 2030 se mantendrán muy parecidos a los de 2020 para la mayoría de los casos.

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tabla 6.3: Potencia instalada en 2020 y estimación de la potencia instalada para 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario.

POTENCIA INSTALADA / MW			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	20 412	30 000	50 000
Eólica	26 811	50 000	70 000
Solar fotovoltaica	11 277	32 000	50 000
Solar térmica	2 304	7 500	15 000
Otras renovables ²	1 071	1 400	2 200
Residuos renovables	119	280	420
Nuclear	7 117	3 245	0
Ciclo combinado	24 562	20 000	0
Carbón	5 492	0	0
Cogeneración ³	5 622	1 000	0
Residuos no renovables	438	0	0
Total	105 224	145 425	187 620

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

CAPÍTULO 6

Tabla 6.4: Factor de utilización en 2020 y su estimación para los años 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario.

FACTOR DE UTILIZACIÓN			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	0.19	0.18	0.18
Eólica	0.23	0.23	0.26
Solar fotovoltaica	0.15	0.15	0.18
Solar térmica	0.22	0.22	0.24
Otras renovables ²	0.48	0.45	0.45
Residuos renovables	0.58	0.50	0.50
Nuclear	0.89	0.87	0.00
Ciclo combinado	0.18	0.20	0.00
Carbón	0.10	0.00	0.00
Cogeneración ³	0.55	0.50	0.00
Residuos no renovables	0.49	0.00	0.00

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

6.3.1.2. Generación eléctrica y su estructura

A partir de los datos de la potencia instalada y del factor de capacidad anteriormente detallados, se han obtenido los siguientes resultados en la producción de energía eléctrica mostrados en las tablas 6.5 y 6.6.

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tabla 6.5: Generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario.

BALANCE ELÉCTRICO / GWh			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	33 291	47 304	78 840
Eólica	53 775	100 740	159 432
Sola fotovoltaica	14 885	42 048	78 840
Solar térmica	4 538	14 454	31 536
Otras renovables ²	4 468	5 519	8 672
Residuos renovables	606	1 226	1 840
Generación renovable	111 563	211 291	359 160
Nuclear	55 757	24 732	0
Ciclo combinado	38 357	35 215	0
Carbón	4 800	0	0
Cogeneración ³	26 919	4 380	0
Residuos no renovables	1 895	0	0
Generación no renovable	127 729	64 327	0
Generación Total	239 292	275 618	359 160

¹ Hidráulica: incluye hidráulica y turbinación de bombeo.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Tabla 6.6: Estructura de la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario.

ESTRUCTURA DE GENERACIÓN / %			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	13.9	17.2	22.0
Eólica	22.5	36.6	44.4
Solar fotovoltaica	6.2	15.3	22.0
Solar térmica	1.9	5.2	8.8
Otras renovables ²	1.9	2.0	2.4
Residuos renovables	0.3	0.4	0.5
Energías renovables	46.6	76.7	100.0
Nuclear	23.3	9.0	0.0
Ciclo combinado	16.0	12.8	0.0
Carbón	2.0	0.0	0.0
Cogeneración ³	11.2	1.6	0.0
Residuos no renovables	0.8	0.0	0.0
Energías no renovables	53.4	23.3	0.0

¹ Hidráulica: incluye hidráulica y turbinación de bombeo.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Las tablas 6.5 y 6.6 muestran el gran avance que necesita el sistema de producción de electricidad español para lograr cumplir los objetivos climáticos. Respecto a 2030 destaca la gran influencia de las energías renovables, que se estima por encima del 75% de toda la generación eléctrica. Dentro de este tipo de energías, en el primer escenario evaluado, la energía eólica tiene una enorme importancia, casi del 50% de todas la energía renovable.

6.3.1.3. Emisiones de CO₂-eq asociadas a la generación eléctrica en la España peninsular

En este apartado se explicarán las diferencias entre cada una de las metodologías de cálculo de las emisiones de CO₂-eq que se muestran en la tabla 6.7, así como las implicaciones de cada una de ellas.

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tabla 6.7: Emisiones de CO₂ equivalente asociadas a la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el primer escenario

EMISIONES DE CO ₂ -eq ASOCIADAS A LA GENERACIÓN PENINSULAR / tCO ₂ -eq						
	2020		2030		2050	
	REE	LCA	REE	LCA	REE	LCA
Hidráulica ¹	0	665 822	0	946 080	0	1 576 800
Eólica	0	860 397	0	1 611 840	0	2 550 912
Solar fotovoltaica	0	528 435	0	1 492 704	0	2 798 820
Solar térmica	0	179 717	0	572 378	0	1 248 826
Otras renovables ²	0	267 741	0	330 714	0	519 694
Residuos renovables	0	14 541	0	29 434	0	44 150
Nuclear	0	1 226 650	0	544 104	0	0
Emisiones no fósiles	0	3 743 302	0	5 527 254	0	8 739 202
Ciclo combinado	14 192 238	15 611 462	13 029 624	14 332 586	0	0
Carbón	4 573 212	5 030 533	0	0	0	0
Cogeneración ³	10 215 657	11 237 223	1 662 210	1 828 431	0	0
Residuos no renovables	470 067	517 074	0	0	0	0
Emisiones fósiles	29 451 174	32 396 292	14 691 834	16 161 017	0	0
Emisiones Totales	29 451 174	36 139 594	14 691 834	21 688 271	0	8 739 202

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Salta a la vista el cambio entre las dos metodologías a la hora de considerar nulas las emisiones asociadas a las energías renovables. Además, también destaca el 10% aproximado en las energías no renovables correspondiente a las emisiones indirectas. Todo esto hace que la metodología de REE no tenga en cuenta un valor estimado en torno a 7 millones de toneladas de CO₂ equivalente en el año 2030, pero sí se tiene en cuenta con el método LCA.

También es importante destacar que la metodología REE en el año 2050 considera que se obtiene la neutralidad en emisiones, pero la metodología LCA siendo más restrictiva no considera en su totalidad esa neutralidad en emisiones.

Destacan dos hechos en particular:

- En primer lugar, la hipótesis tomada respecto a la energía nuclear hizo que se necesitara más potencia instalada y, por ende, más generación eléctrica procedente de la cogeneración y del ciclo combinado, lo que genera un mayor número de emisiones, puesto que como se puede comprobar tanto en la tabla 6.2 como en la tabla 6.7 estas tecnologías tienen mayor impacto medioambiental, en cuanto a emisiones de GEI, que la energía nuclear.

- En segundo lugar, tal y como se aprecia en la tabla 6.2, la energía eólica tiene menos impacto medioambiental que las demás renovables, esto conlleva que, a pesar de suponer en torno a un 50% de la generación eléctrica renovable, no llega a implicar ni un 30% de las emisiones de CO₂-eq de las energías renovables.

6.3.1.4. Objetivos y resultados

En este apartado se va a detallar si este escenario ha cumplido con los objetivos marcados tanto por la UE como por España y los beneficios medioambientales que supone este escenario.

- La tabla 6.6 muestra que las energías renovables en 2030 siguiendo este escenario supondrán un 76.7 % de la generación eléctrica total, lo cual cumple el objetivo por parte de España fijado en un 74 %.
- La generación eléctrica estimada para 2030, tal y como se muestra en la tabla 6.5, es de 275 618 GWh, superando la demanda establecida para ese año de 271 828 GWh, que se encuentra en la tabla 6.1.
- Del mismo modo que para 2030, también se debe comprobar que se satisface la demanda eléctrica en 2050 estimada en 353 377 GWh, como se indica en la tabla 6.1, y como se muestra en la tabla 6.5 la generación eléctrica para 2050 es de 359 160 GWh. Por lo tanto, se cumple el objetivo marcado.
- En 2050 se ha alcanzado el objetivo de la generación eléctrica únicamente procedente de energías renovables, lo que se traduce en la neutralidad de emisiones para la metodología REE.

Los resultados obtenidos en el escenario 1 determinan una reducción de las emisiones de CO₂-eq en 2030 con respecto a las emisiones de 1990 (54 805 723 tCO₂-eq) del 73.2 % para la metodología REE y del 60.4 % para la metodología LCA, lo que supone una mejora más que considerable. Para el año 2050 la reducción de estas emisiones es mucho mayor, del 100 % respecto a 1990 en el caso de la metodología REE, y del 84.1 % respecto a 1990 en el caso de la metodología LCA.

6.3.2. Escenario 2

Se va a presentar otro escenario como prueba para la distribución del sistema eléctrico peninsular bajo el cumplimiento de los objetivos marcados por la UE y por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) para 2030 y 2050.

En este segundo escenario, para el año 2030 se ha utilizado la hipótesis de que las centrales nucleares han visto renovadas sus licencias, siguiendo en

activo todas ellas. Además, se supone que la potencia instalada procedente de energías no renovables es únicamente la potencia instalada de la energía nuclear, tal y como se muestra en la tabla 6.8. Esto se debe al alto factor de utilización que tiene esta tecnología, tabla 6.9, que supone una mayor generación de electricidad con cierta potencia instalada, lo que tiene numerosos beneficios medioambientales, que se detallarán en los siguientes apartados.

Con respecto a las energías renovables se ha supuesto un gran desarrollo de la energía hidráulica por medio de la construcción de centrales hidráulicas de bombeo, y un desarrollo lineal de las energías solar fotovoltaica y solar térmica. La estimación para el horizonte 2050 es únicamente renovable, lo que supone un gran esfuerzo, de modo que se ha estimado que la energía solar fotovoltaica tendrá una gran presencia debida al desarrollo de centrales en alta mar, generando así un mayor factor de utilización (tabla 6.9); mientras que las demás tecnologías experimentarán un desarrollo algo más lineal.

6.3.2.1. Potencia instalada y factor de utilización

A continuación, se muestran las tablas 6.8 y 6.9 correspondientes a la potencia instalada y el factor de utilización, respectivamente, del segundo escenario.

CAPÍTULO 6

Tabla 6.8: Potencia instalada en 2020 y estimación de la potencia instalada para 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.

POTENCIA INSTALADA / MW			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	20 412	40 000	60 000
Eólica	26 811	50 000	70 000
Solar fotovoltaica	11 277	27 000	45 000
Solar térmica	2 304	6 000	20 000
Otras renovables ²	1 071	2 000	3 000
Residuos renovables	119	350	480
Nuclear	7 117	7 117	0
Ciclo combinado	24 562	0	0
Carbón	5 492	0	0
Cogeneración ³	5 622	0	0
Residuos no renovables	438	0	0
Total	105 224.1	132 467.3	198 480.0

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tabla 6.9: Factor de utilización en 2020 y su estimación para los años 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.

FACTOR DE UTILIZACIÓN			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	0.19	0.18	0.18
Eólica	0.23	0.23	0.23
Solar fotovoltaica	0.15	0.15	0.18
Solar térmica	0.22	0.22	0.22
Otras renovables ²	0.48	0.45	0.45
Residuos renovables	0.58	0.50	0.50
Nuclear	0.89	0.87	0.00
Ciclo combinado	0.18	0.00	0.00
Carbón	0.10	0.00	0.00
Cogeneración ³	0.55	0.00	0.00
Residuos no renovables	0.49	0.00	0.00

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

6.3.2.2. Generación eléctrica y su estructura

Los resultados de estas hipótesis para la potencia instalada están recogidos en las tablas 6.10 y 6.11, donde se muestra la generación eléctrica por tecnología y su estructura global.

CAPÍTULO 6

Tabla 6.10: Generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.

BALANCE ELÉCTRICO / GWh			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	33 291	63 072	94 608
Eólica	53 775	100 740	141 036
Sola fotovoltaica	14 885	35 478	70 956
Solar térmica	4 538	11 563	38 544
Otras renovables ²	4 468	7 884	11 826
Residuos renovables	606	1 533	2 102
Generación renovable	111 563	220 270	359 072
Nuclear	55 757	54 242	0
Ciclo combinado	38 357	0	0
Carbón	4 800	0	0
Cogeneración ³	26 919	0	0
Residuos no renovables	1 895	0	0
Generación no renovable	127 729	54 242	0
Generación Total	239 292	274 512	359 072

¹ Hidráulica: incluye hidráulica y turbinación de bombeo.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tabla 6.11: Estructura de la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.

ESTRUCTURA DE GENERACIÓN / %			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	13.9	23.0	26.3
Eólica	22.5	36.7	39.3
Solar fotovoltaica	6.2	12.9	19.8
Solar térmica	1.9	4.2	10.7
Otras renovables ²	1.9	2.9	3.3
Residuos renovables	0.3	0.6	0.6
Energías renovables	46.6	80.2	100.0
Nuclear	23.3	19.8	0.0
Ciclo combinado	16.0	0.0	0.0
Carbón	2.0	0.0	0.0
Cogeneración ³	11.2	0.0	0.0
Residuos no renovables	0.8	0.0	0.0
Energías no renovables	53.4	19.8	0.0

¹ Hidráulica: incluye hidráulica y turbinación de bombeo.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Analizando las tablas 6.10 y 6.11 se pueden entender las implicaciones que tiene realizar las hipótesis del segundo escenario. Probablemente lo más destacable de este escenario, en lo referente a 2030, sea que la generación no renovable exclusivamente procede de la energía nuclear y no llega a suponer un 20 % de la estructura de generación. Esto genera un mayor peso en las energías renovables, de las cuales la mayor trascendencia está en la eólica, que supone en torno al 50 % de la energía eléctrica renovable por su alto factor de utilización (tabla 6.9). Otro efecto derivado de las hipótesis es el gran aumento que ha tenido la generación renovable, aumentando en torno a un 100 %, respecto a 2020, en tan solo en 10 años.

La estimación para 2050 ha de ser totalmente renovable, lo que supone el cierre total de las centrales nucleares para entonces. De este modo las energías renovables necesitarán una mayor presencia, de modo que se pueda satisfacer la demanda eléctrica. En la tabla 6.11 se puede comprobar que continúa la mayor trascendencia de la eólica y que las energías solares han experimentado un gran desarrollo en 20 años.

CAPÍTULO 6

6.3.2.3. Emisiones de CO₂-eq asociadas a la generación eléctrica en la España peninsular

Seguidamente en la figura 6.12 se muestra la diferencia de los resultados del cálculo de las emisiones de CO₂ según cada metodología utilizada.

Tabla 6.12: Emisiones de CO₂ equivalente asociadas a la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el segundo escenario.

EMISIONES DE CO ₂ -eq ASOCIADAS A LA GENERACIÓN PENINSULAR / tCO ₂ -eq						
	2020		2030		2050	
	REE	LCA	REE	LCA	REE	LCA
Hidráulica ¹	0	665 822	0	1 261 440	0	1 892 160
Eólica	0	860 397	0	1 611 840	0	2 256 576
Solar fotovoltaica	0	528 435	0	1 259 469	0	2 518 938
Solar térmica	0	179 717	0	457 903	0	1 526 342
Otras renovables ²	0	267 741	0	472 449	0	708 673
Residuos renovables	0	14 541	0	36 792	0	50 458
Nuclear	0	1 226 650	0	1 193 330	0	0
Emisiones no fósiles	0	3 743 302	0	6 293 223	0	8 953 147
Ciclo combinado	14 192 238	15 611 462	0	0	0	0
Carbón	4 573 212	5 030 533	0	0	0	0
Cogeneración ³	10 215 657	11 237 223	0	0	0	0
Residuos no renovables	470 067	517 074	0	0	0	0
Emisiones fósiles	29 451 174	32 396 292	0	0	0	0
Emisiones Totales	29 451 174	36 139 594	0	6 293 223	0	8 953 147

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Examinando la tabla 6.12, se observa una clara diferencia entre las dos metodologías, donde la metodología REE no tiene en cuenta en torno a 7 millones de toneladas de CO₂-eq para los años 2020 y 2030. Mientras que, para el caso de 2050, las emisiones que no tiene en cuenta esta metodología se elevan a 9 millones de toneladas de CO₂-eq.

Sin lugar a dudas lo más destacable que genera esta hipótesis es que alcanza la neutralidad en emisiones, según la metodología REE, mucho antes del objetivo programado que era 2050, puesto que ya en 2030 logra esta neutralidad. Esto se debe a que esta metodología considera que la energía nuclear tiene un factor de emisiones cero y, por lo tanto, no genera emisiones, lo que supone un gran beneficio medioambiental.

Quizás este escenario es demasiado ambicioso a la hora de representarlo en la práctica, pero igualmente hay que tenerlo en cuenta puesto que puede suponer una alternativa muy importante en caso de que en años venideros se apruebe lograr esta neutralidad antes de 2050.

6.3.2.4. Objetivos y resultados

De forma resumida se concreta el logro de los objetivos propuestos por la UE y el MITECO referentes a los años 2030 y 2050, así como los resultados que suponen adoptar este escenario.

- El objetivo de lograr en 2030 un 74 % de energías renovables en la generación eléctrica ha sido alcanzado, tal y como se muestra en la tabla 6.11, donde se aprecia que las energías renovables supondrán un 80.2v% de la energía eléctrica producida en 2030.
- La demanda eléctrica por satisfacer para el año 2030 era de 271 828 GWh (tabla 6.1), mientras que siguiendo este segundo escenario se prevé lograr una generación eléctrica de 274 512.5 GWh (tabla 6.10), lo que supone lograr el objetivo y satisfacer esa demanda estimada.
- También existe una demanda de electricidad mínima para 2050 establecida en 353 377 GWh. Utilizando la tabla 6.10 se puede determinar que la generación eléctrica estimada para este año será de 274 512.5 GWh, por lo que se puede concluir que se cumple este objetivo.
- El principal objetivo por lograr es la neutralidad en emisiones para 2050 y como se ha comentado anteriormente, en base a los resultados mostrados en la tabla 6.12, la neutralidad se logra mucho antes, en 2030.

Como resultado de seguir este segundo escenario se logrará una reducción de las emisiones CO₂-eq del 100 % respecto a 1990 (54 805 723 tCO₂-eq) para la metodología REE y del 88.5 % respecto a 1990 para la metodología LCA correspondiente a 2030. En lo referente a 2050, en el caso de la metodología REE se ha reducido un 100 % respecto a 1990 y en el caso de la metodología LCA un 83.7 % respecto a 1990.

Salta a la vista el porcentaje de reducción de emisiones en 2050 de la metodología LCA comparándolo con el porcentaje en 2030 también para esta metodología. Y es que, uno puede pensar que lo lógico es que sea un porcentaje mayor en 2050, sin embargo, al haber una mayor demanda de energía eléctrica en 2050 el porcentaje es menor, pero el recorte neto es mayor. Para dar una visión más detallada la demanda eléctrica en 2050 se estima que crezca en un 30 % respecto a 2020, mientras que la diferencia de los porcentajes de reducción entre esos años es del 4.9 %.

6.3.3. Escenario 3

En el tercer escenario se ha tomado la hipótesis de que las centrales nucleares han sido renovadas hasta una fecha posterior a 2030, pero también se tiene potencia instalada de otras no renovables, en este caso de ciclo

combinado y cogeneración, como se muestra en las tablas 6.13 y 6.14. Este escenario supone un escenario más posible, puesto que, las centrales de Cofrentes, Vandellós II y Trillo, ya tienen una fecha de cierre posterior a 2030 [81], y las otras cuatro podrían tener una renovación de la licencia. Además, se ha supuesto un desarrollo de la energía a partir de residuos renovables para 2030.

En el caso del horizonte 2050, se ha considerado que la energía fotovoltaica tendrá un gran auge, llegando a niveles cercanos a la energía eólica, se considera que este escenario puede deberse a la inclusión de paneles fotovoltaicos en alta mar, así como un gran avance en los sistemas de almacenamiento de energía solar.

6.3.3.1. Potencia instalada y factor de utilización

A continuación, se muestra las tablas 6.13 y 6.14 donde se muestran las hipótesis realizadas en el tercer escenario de la predicción de potencia instalada y factor de utilización para 2030 y 2050.

Tabla 6.13: Potencia instalada en 2020 y estimación de la potencia instalada para 2030 y 2050 en la España peninsular en el tercer escenario.

POTENCIA INSTALADA / MW			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	20 412	30 000	50 000
Eólica	26 811	50 000	65 000
Solar fotovoltaica	11 277	27 000	62 500
Solar térmica	2 304	6 000	15 000
Otras renovables ²	1 071	1 200	3 000
Residuos renovables	119	1 500	2 100
Nuclear	7 117	7 117	0
Ciclo combinado	24 562	5 000	0
Carbón	5 492	0	0
Cogeneración ³	5 622	1 000	0
Residuos no renovables	438	0	0
Total	105 224.1	128 817.3	197 600.0

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tabla 6.14: Factor de utilización en 2020 y su estimación para los años 2030 y 2050 en la España peninsular en el tercer escenario.

FACTOR DE UTILIZACIÓN			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	0.19	0.18	0.18
Eólica	0.23	0.23	0.23
Solar fotovoltaica	0.15	0.15	0.18
Solar térmica	0.22	0.22	0.22
Otras renovables ²	0.48	0.45	0.45
Residuos renovables	0.58	0.50	0.50
Nuclear	0.89	0.87	0.00
Ciclo combinado	0.18	0.20	0.00
Carbón	0.10	0.00	0.00
Cogeneración ³	0.55	0.50	0.00
Residuos no renovables	0.49	0.00	0.00

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

6.3.3.2. Generación eléctrica y su estructura

En las tablas 6.15 y 6.16 se muestran los resultados para la generación eléctrica y su estructura siguiendo el tercer escenario planteado.

CAPÍTULO 6

Tabla 6.15: Generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el tercer escenario.

BALANCE ELÉCTRICO / GWh			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	33 291	47 304	78 840
Eólica	53 775	100 740	130 962
Sola fotovoltaica	14 885	35 478	98 550
Solar térmica	4 538	11 563	28 908
Otras renovables ²	4 468	4 730	11 826
Residuos renovables	606	6 570	9 198
Generación renovable	111 563	206 386	358 284
Nuclear	55 757	54 242	0
Ciclo combinado	38 357	8 804	0
Carbón	4 800	0	0
Cogeneración ³	26 919	4 380	0
Residuos no renovables	1 895	0	0
Generación no renovable	127 729	67 426	0
Generación Total	239 292	273 812	358 284

¹ Hidráulica: incluye hidráulica y turbinación de bombeo.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tabla 6.16: Estructura de la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el tercer escenario.

ESTRUCTURA DE GENERACIÓN / %			
	2020	2030	2050
Hidráulica ¹	13.9	17.3	22.0
Eólica	22.5	36.8	36.6
Solar fotovoltaica	6.2	13.0	27.5
Solar térmica	1.9	4.2	8.1
Otras renovables ²	1.9	1.7	3.3
Residuos renovables	0.3	2.4	2.6
Energías renovables	46.6	75.4	100.0
Nuclear	23.3	19.8	0.0
Ciclo combinado	16.0	3.2	0.0
Carbón	2.0	0.0	0.0
Cogeneración ³	11.2	1.6	0.0
Residuos no renovables	0.8	0.0	0.0
Energías no renovables	53.4	24.6	0.0

¹ Hidráulica: incluye hidráulica y turbinación de bombeo.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Analizando las tablas 6.15 y 6.16 se pueden entender las repercusiones que tiene utilizar la hipótesis del tercer escenario. Respecto a 2030, las energías renovables han tomado un peso muy importante llegando a superar el 75% de la generación eléctrica. Dentro de las renovables, la energía de mayor trascendencia sin duda es la eólica, que al igual que en los demás escenarios supone en torno a un 50% de la energía renovable. Además, hay que destacar el aumento del porcentaje de la energía procedente de residuos renovables. Hablando de las energías no renovables, a pesar de la grandísima influencia de la nuclear, también hay cierto porcentaje de electricidad procedente de otras fuentes, como el ciclo combinado y la cogeneración.

El horizonte 2050 se plantea totalmente renovable, de modo que las energías renovables experimentaran un gran desarrollo tanto tecnológico como en la construcción de nuevas centrales. Llama la atención que, pese al amplio desarrollo en potencia instalada de la energía fotovoltaica, sigue produciendo mayor electricidad la energía eólica; esto se debe al factor de utilización de cada una de ellas.

CAPÍTULO 6

6.3.3.3. Emisiones de CO₂-eq asociadas a la generación eléctrica en la España peninsular

En este apartado se mostrará la diferencia entre el cálculo de las emisiones de CO₂-eq para cada una de las metodologías aplicadas en el tercer escenario. Los resultados de las emisiones aplicando este escenario se encuentran en la figura 6.17.

Tabla 6.17: Emisiones asociadas a la generación eléctrica en 2020 y su estimación para 2030 y 2050 en la España peninsular en el tercer escenario.

EMISIONES DE CO ₂ -eq ASOCIADAS A LA GENERACIÓN PENINSULAR / tCO ₂ -eq						
	2020		2030		2050	
	REE	LCA	REE	LCA	REE	LCA
Hidráulica ¹	0	665 822	0	946 080	0	1 576 800
Eólica	0	860 397	0	1 611 840	0	2 095 392
Solar fotovoltaica	0	528 435	0	1 259 469	0	3 498 525
Solar térmica	0	179 717	0	457 903	0	1 144 757
Otras renovables ²	0	267 741	0	283 469	0	708 673
Residuos renovables	0	14 541	0	157 680	0	220 752
Nuclear	0	1 226 650	0	1 193 330	0	0
Emisiones no fósiles	0	3 743 302	0	5 909 771	0	9 244 899
Ciclo combinado	14 192 238	15 611 462	3 257 406	3 583 147	0	0
Carbón	4 573 212	5 030 533	0	0	0	0
Cogeneración ³	10 215 657	11 237 223	1 662 210	1 828 431	0	0
Residuos no renovables	470 067	517 074	0	0	0	0
Emisiones fósiles	29 451 174	32 396 292	4 919 616	5 411 577	0	0
Emisiones Totales	29 451 174	36 139 594	4 919 616	11 321 349	0	9 244 899

¹ Hidráulica: incluye hidráulica convencional y mixta, bombeo puro y resto de hidráulica.

² Otras renovables: REE también lo denomina como térmicas renovables, incluyen biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

³ Cogeneración: REE también lo denomina como térmica no renovable.

Utilizando la tabla 6.17 se pueden razonar numerosas conclusiones. En referencia a 2030 principalmente resalta la diferencia entre las emisiones de una metodología y otra, puesto que la metodología REE no considera en torno a 6 millones de toneladas de CO₂-eq en emisiones indirectas, a pesar de que estas emisiones indirectas superen las emisiones directas de la metodología REE (en torno a 5 millones). Centrándose en la metodología del análisis del ciclo de vida, LCA, resaltar que incluso obteniendo electricidad a partir de fuentes fósiles las emisiones fósiles son menores que las emisiones no fósiles, lo que supone un escenario idóneo para la transición a la neutralidad.

En lo referente a 2050, siguiendo el método REE se considera que se ha logrado la neutralidad en emisiones de CO₂-eq, es decir, que se obtiene energía sin emitir CO₂-eq a la atmósfera. Sin embargo, utilizando el método LCA para el mismo escenario, no se considera que las emisiones sean nulas, aunque sí muy bajas. También destaca que el desarrollo considerado de las energías

fotovoltaica y de residuos renovables generan unas emisiones mayores en proporción a la energía eólica, debido a su factor de emisiones.

6.3.3.4. Objetivos y resultados

Para concluir este escenario se detallará el cumplimiento de los objetivos medioambientales que se han buscado en la realización del tercer escenario presentado.

- El objetivo impuesto por el MITECO de conseguir un 74 % de energías renovables en la generación eléctrica en 2030 ha sido logrado como se muestra en la figura 6.16, donde se puede ver que la trascendencia de las energías renovables supone un 75.4 % de la producción de electricidad en 2030.
- Otro de los objetivos es alcanzar la demanda eléctrica en 2030, que ha sido estimada en 271 828 GWh según muestra la tabla 6.1. Tras obtener los resultados de este escenario se ha comprobado que supondría una generación eléctrica estimada de 273 812 GWh que superan el objetivo programado.
- Al igual que para 2030, también existe una demanda eléctrica mínima para 2050, la cual se estima en 353 377 GWh, mientras que los resultados del escenario tres arrojan una estimación de 358 284 GWh, lo que supone el cumplimiento del objetivo.
- Como objetivo prioritario impuesto por la UE se busca obtener la neutralidad en emisiones en 2050 y, como se muestra en la tabla 6.17, ese objetivo se logra claramente.

En el caso de aplicar este tercer escenario, en 2030 se lograrán unas reducciones de las emisiones de CO₂-eq del 91 % respecto a 1990 para la metodología REE y del 79.3 % respecto a 1990 para la metodología LCA. En 2050 se habrá logrado una reducción del 100 % respecto a 1990 en el caso del método REE, donde se logra la neutralidad en emisiones, sin embargo, con el método LCA se logra una reducción del 83.1 % de las emisiones de CO₂ respecto a 1990.

6.4. Comparativa de los escenarios

Finalmente se va a realizar una comparativa de los resultados de todos los escenarios tratados para dar una visión más global de cuáles son las ventajas de cada uno de ellos, así como los puntos más fuertes y la aplicación real en el sistema eléctrico español actual.

Generación eléctrica

CAPÍTULO 6

En todos los escenarios se ha buscado generar una cantidad similar de electricidad para que estos escenarios sean sustitutivos entre sí y logren unos mismos objetivos al margen de este factor.

El primer y el tercer escenario tienen porcentajes parecidos en cuanto a la estructura de generación renovable, pero el segundo escenario tiene una mayor presencia en renovables debido a que únicamente se ha considerado que se satisfacía la demanda con una única energía no renovable, la energía nuclear. A pesar de ello, tal y como está distribuido el 'mix' eléctrico actual en España es difícil que se dé una situación como en el escenario 2.

Emisiones de CO₂ equivalente

En este punto es donde más diferencia se encuentran entre los escenarios presentados.

Para el escenario 1 las emisiones tanto con la metodología REE como con la LCA son mucho mayores que en los demás escenarios. Eso se debe a que todavía en 2030 existe una mayor presencia de las energías fósiles en comparación con los demás escenarios propuestos. Sin embargo, en 2050 al eliminarse la contribución de los combustibles fósiles se igualan las emisiones de todos los escenarios.

El escenario 2, tal y como se puede pensar, tiene los mayores beneficios medioambientales, puesto que, presenta casi la mitad de las emisiones que en cada uno de los otros escenarios. Esto se debe a la suposición del abandono de las energías fósiles para el año 2030, lo que supone un escenario difícil de lograrse con el actual sistema eléctrico.

El escenario 3 es un punto intermedio entre los dos primeros escenarios. No concibe el fin del uso de las energías fósiles, pero sí una fuerte reducción de estas. En este escenario destaca la igualdad entre las emisiones asociadas a las energías fósiles y las no fósiles, generando así un nivel de emisiones entre medias de los dos primeros escenarios.

Factor de emisión global

A continuación, en la tabla 6.18 se muestran los factores de emisión global para cada año de predicción según la metodología aplicada y el escenario.

Análisis de escenarios futuros en la producción eléctrica para 2030 y 2050

Tabla 6.18: Factores de emisión global para la predicción en 2030 y 2050 según las metodologías REE y LCA.

Factor de emisión de CO ₂ -eq global / tCO ₂ eq-MWh ⁻¹				
	2030		2050	
	REE	LCA	REE	LCA
Escenario 1	0.053	0.079	0.000	0.024
Escenario 2	0.000	0.023	0.000	0.025
Escenario 3	0.018	0.041	0.000	0.026

De la tabla 6.18 se pueden obtener las mismas conclusiones anteriormente detalladas para cada uno de los años. Se comprueba, en primer lugar, que para 2050 los factores son muy parecidos entre sí en ambas metodologías y, en segundo lugar, para 2030 el primer escenario muestra un alto factor de emisión con los dos métodos, el segundo escenario muestra un factor de emisión muy ambicioso y el tercero, un punto medio entre los dos.

Cabe destacar que el factor de emisión en cualquiera de los escenarios tendrá un orden menor al del sistema eléctrico actual, puesto que en 2020 el factor global con la metodología REE fue de 0.1231 y con la metodología LCA de 0.1311.

Conclusiones

A modo de resumen final, se han considerado tres escenarios posibles sobre el futuro del sistema eléctrico de la España peninsular. Ahora se valorará la viabilidad real para emplearse estos escenarios y sus beneficios medioambientales.

El escenario 1 es el más viable, puesto que no tendría que darse ningún hecho de renovación de licencias de centrales. Además, se mantienen las energías fósiles que no se podrán erradicar de forma rápida, aunque medioambientalmente es el menos favorable de los 3 debido a la presencia de las mismas.

El escenario 2 tiene pocas posibilidades de ocurrir, puesto que la erradicación de las energías fósiles supone un gran esfuerzo económico, así como en infraestructuras dedicadas a las energías renovables. A pesar de ello, este escenario es el más favorable de los tres puesto que logra el objetivo de la neutralidad en emisiones, según el método REE, en 2030 cuando estaba programado para 2050.

El escenario 3 tiene posibilidades de ocurrir, necesitando únicamente la renovación de los cuatro reactores nucleares que tienen fecha de cierre anterior a 2030. Además, continua cierta dependencia de las energías fósiles, por lo que le da un aspecto más posible al escenario. Respecto a los beneficios

CAPÍTULO 6

medioambientales es un término medio entre los dos escenarios anteriores, donde se nota la transición hacia la neutralidad.

Cabe destacar que el escenario óptimo sería un escenario en el que la potencia instalada de las nucleares provenga de los 3 reactores que estarán en activo y con una dependencia de las energías fósiles como en el escenario 3. De modo que este escenario sería muy viable y sería muy favorable medioambientalmente. El inconveniente es que implica un enorme desarrollo de las energías renovables, lo que supondría un esfuerzo casi irreal, debido a que los cuatro reactores cerrados en esta hipótesis generan una elevada cantidad de electricidad, difícilmente compensable con energías renovables.

7. Conclusiones

Tras el desarrollo completo de este proyecto, se pueden obtener una serie de conclusiones en base a los objetivos prefijados al comienzo del trabajo.

Se ha presentado una visión global del recorrido de la energía tanto a nivel mundial como en España, destacando el importante papel de la producción de energía eléctrica como paso intermedio entre los recursos energéticos y la utilización final de la energía en los diferentes sectores económicos.

También se ha proporcionado una información general sobre los sistemas más extendidos de generación eléctrica, sus características técnicas y los problemas medioambientales que estos generan, para entender de forma mucho más clara el escenario actual y el estudio de los escenarios futuros realizado.

La estructura del sistema eléctrico de la España peninsular ha sido descrita detalladamente, tanto en la actualidad como la evolución que ha experimentado para llegar a día de hoy, a partir del análisis detallado de los datos de potencia instalada, producción de energía eléctrica y emisiones de gases de efecto invernadero, disponibles en la página web de Red Eléctrica Española (REE). Se han analizado los datos disponibles desde el año 1990 hasta 2020, en intervalos de 5 años.

A partir de estos datos brutos se ha calculado los valores del factor de utilización y el factor de emisiones de cada tecnología para las instalaciones situadas en la España peninsular desde el año 1990 hasta el año 2020. Se han comparado estos valores con valores típicos de estas tecnologías obtenidos de la literatura. Se ha analizado la situación actual de la estructura de potencia instalada y de producción de energía eléctrica en España y la evolución a lo largo de los últimos 30 años.

Se han presentado dos de las metodologías que se pueden seguir a la hora que calcular las emisiones de CO₂ equivalente asociado a la generación eléctrica, la utilizada por REE y la denominada LCA, que considera las emisiones de una forma global, teniendo en cuenta todo el ciclo de vida de una instalación de generación de energía eléctrica. Se plantea una tercera metodología, denominada LCA extra, que supone una modificación de la metodología LCA, utilizando datos obtenidos en este trabajo a partir de la metodología REE, ligeramente modificados. Se muestra la especial importancia que tienen en estas metodologías el valor del factor de utilización y el factor de emisión en el cálculo de dichas emisiones. A partir de los valores de factor de utilización y factor de emisiones de cada tecnología calculados en este trabajo, se ha calculado el factor de emisiones global de la España peninsular y su evolución desde 1990 hasta 2020. A partir de este análisis se puede ver la

CAPÍTULO 6

transición que ya ha iniciado el sistema eléctrico español hacia una generación cada vez más renovable y con menores emisiones asociadas.

Todo ello, lleva a una conclusión más específica, de la que se puede concluir que la metodología LCA extra para el cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente es la más eficiente, puesto que, la metodología seguida hoy en día no tiene en cuenta una gran cantidad de emisiones, también importantes, como son las emisiones indirectas; llegando a considerar una neutralidad climática únicamente con la extinción de las energías fósiles, mientras que la metodología LCA extra, sí contabiliza emisiones en ese escenario, lo que posiciona a esta metodología como mucho más exigente y exacta.

Se han presentado los objetivos medioambientales de la Unión Europea para 2030 y 2050 y su adaptación a los objetivos de España. Se han trasladado estos objetivos generales a las implicaciones que tienen en el ámbito de la generación de energía eléctrica en España.

Por último, se han analizado tres escenarios distintos para 2030 y 2050 de generación de energía eléctrica en España. Se ha calculado el nivel de cumplimiento de los objetivos medioambientales europeos y españoles de estos tres distintos escenarios. Para ello se han utilizado las metodologías del cálculo de emisiones descritas anteriormente, a partir de los valores de factor de utilización y factor de emisiones calculados en este trabajo. Se indican las hipótesis que se han tenido en cuenta para estas estimaciones.

Bibliografía

- [1] Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional, *La Nueva Geopolítica de la Energía*. España, 2010.
- [2] BP, «Statistical Review of World Energy», 2020.
- [3] IEA, «IEA Sankey Diagram», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/sankey/>. [Accedido: 18-ene-2021].
- [4] Naturgy, «Gas natural vehicular: la alternativa más ecológica a los combustibles tradicionales». [En línea]. Disponible en: <https://www.naturgy.es/es/conocenos/eficiencia+y+bienestar/en+el+transporte/1297154960697/vehiculos+a+gas.html>. [Accedido: 28-ene-2021].
- [5] Interenerstat, «Non-Energy Use», 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.interenerstat.org/definitions/results.asp?id=168&Type=Flows#:~:text=oil and gas.,Non energy use includes energy products used as raw materials,or transformed into another fuel.> [Accedido: 28-ene-2021].
- [6] AOP, «¿Cómo es una refinería de petróleo?», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.aop.es/blog/2020/02/25/como-es-una-refineria-de-petroleo/>. [Accedido: 28-ene-2021].
- [7] A. Cerrillo, «España abandona el carbón», *La Vanguardia*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/natural/20200106/472723824052/carbon-energia-espana-espana-co2.html>. [Accedido: 29-ene-2021].
- [8] Endesa, «Cómo se genera la energía eléctrica», 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.endesa.com/es/conoce-la-energia/energia-y-mas/como-se-genera-electricidad?utm_source=blog_twenergy. [Accedido: 01-feb-2021].
- [9] Twenergy, «¿Qué es la energía hidráulica?», 2019. [En línea]. Disponible en: https://twenergy.com/energia/energia-hidraulica/que-es-la-energia-hidraulica-426/#¿Como_funcionan_las_centrales_hidroelectricas. [Accedido: 02-feb-2021].
- [10] «Unesa». [En línea]. Disponible en: www.unesa.es. [Accedido: 06-feb-2021].
- [11] D. Inmaculada y R. Ramón, «Centrales de Generacion de Energia Electrica», 2013.
- [12] N. Y. Amponsah, M. Troldborg, B. Kington, I. Aalders, y R. L. Hough, «Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 461-475, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.087.
- [13] World Nuclear Association, «How does a nuclear reactor work?» [En línea]. Disponible en: <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-does-a-nuclear-reactor-work.aspx>. [Accedido: 04-feb-2021].

- [14] Foro Nuclear, «Etapas para la obtención del combustible nuclear a partir del uranio». [En línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/etapas-para-la-obtencion-del-combustible-nuclear-a-partir-del-uranio/>. [Accedido: 05-feb-2021].
- [15] World Nuclear Association, «How can nuclear combat climate change?» [En línea]. Disponible en: <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-can-nuclear-combat-climate-change.aspx>. [Accedido: 05-feb-2021].
- [16] Foro Nuclear, «Energía libre de emisiones». [En línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/valores-del-sector/energia-libre-de-emisiones/>. [Accedido: 05-feb-2021].
- [17] World Nuclear Association, «CO2 Implications of Electricity Generation». [En línea]. Disponible en: <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/co2-implications-of-electricity-generation.aspx>. [Accedido: 04-feb-2021].
- [18] A. N. Lascano Escobar, «EL PAPEL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL: INFLUENCIA DE LA NORMATIVA EN LA ENERGÍA EÓLICA», *Univ. Valladolid*, p. 114, 2018.
- [19] Fundación Endesa, «Central térmica convencional». [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-electricas-convencionales/a201908-central-termica-convencional>. [Accedido: 06-feb-2021].
- [20] Grupo EDP, «Centrales de carbón: una lucha por el equilibrio». [En línea]. Disponible en: <https://www.edp.com/es/centrales-de-carbon-una-lucha-por-el-equilibrio>. [Accedido: 05-feb-2021].
- [21] D. Page, «España apaga para siempre la mitad de sus centrales de carbón», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.elindependiente.com/economia/2020/06/27/espana-apaga-para-siempre-la-mitad-de-sus-centrales-de-carbon/>. [Accedido: 05-feb-2021].
- [22] Renovetec, «CICLOS COMBINADOS». [En línea]. Disponible en: <http://www.cicloscombinados.com/cicloscombinados.html>. [Accedido: 09-feb-2021].
- [23] Naturgy, «Ciclos combinados de gas natural: tecnología punta y desarrollo sostenible». [En línea]. Disponible en: <https://www.naturgy.es/es/conocenos/compromiso+y+sostenibilidad/cambio+climatico/energias+responsables/1297101993224/ciclos+combinados.html>. [Accedido: 09-feb-2021].
- [24] Energía y sociedad, «EL VALOR DE LA FLEXIBILIDAD DE LOS CICLOS COMBINADOS DE GAS NATURAL». [En línea]. Disponible en: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/1-3-el-valor-de-la-flexibilidad-de-los-ciclos-combinados-de-gas-natural/>. [Accedido: 09-feb-

2021].

- [25] A. Fernández Muerza, «Centrales térmicas de ciclo combinado», 2007. [En línea]. Disponible en: [https://www.consumer.es/medio-ambiente/centrales-termicas-de-ciclo-combinado.html#:~:text=Inconvenientes para el medio ambiente,NOx\) que generan lluvias ácidas.](https://www.consumer.es/medio-ambiente/centrales-termicas-de-ciclo-combinado.html#:~:text=Inconvenientes para el medio ambiente,NOx) que generan lluvias ácidas.) [Accedido: 11-feb-2021].
- [26] IRENA, «Wind energy». [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/wind>. [Accedido: 12-feb-2021].
- [27] IRENA, «Technologies». [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies>. [Accedido: 12-feb-2021].
- [28] Wind Europe, «Wind energy in Europe in 2019». [En línea]. Disponible en: <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/wind-energy-in-europe-in-2019-trends-and-statistics/#presentations>. [Accedido: 12-feb-2021].
- [29] APPA, «Tecnología eólica». [En línea]. Disponible en: <https://www.appa.es/appa-eolica/tecnologia-eolica/>. [Accedido: 12-feb-2021].
- [30] OpexEnergy, «Eólica». [En línea]. Disponible en: http://opex-energy.com/eolica/principales_elementos_aerogeneradores.html. [Accedido: 12-feb-2021].
- [31] IDAE, «Eólica». [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica>. [Accedido: 12-feb-2021].
- [32] Iberdrola, «¿Sabes cómo funcionan los parques eólicos terrestres?» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/como-funcionan-parques-eolicos-terrestres>. [Accedido: 13-feb-2021].
- [33] Iberdrola, «¿Sabes cómo funcionan los parques eólicos marinos?» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/como-funciona-la-energia-eolica-marina>. [Accedido: 13-feb-2021].
- [34] Iberdrola, «¿Cómo funcionan las plantas fotovoltaicas?» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/que-es-energia-fotovoltaica>. [Accedido: 15-feb-2021].
- [35] Fundación Endesa, «Central solar». [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-solar>. [Accedido: 15-feb-2021].
- [36] IRENA, «Solar energy». [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/solar>. [Accedido: 15-feb-2021].
- [37] IDAE, «SOLAR FOTOVOLTAICA». [En línea]. Disponible en:

- <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>. [Accedido: 15-feb-2021].
- [38] IDAE, «ENERGÍA SOLAR TÉRMICA». [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/energia-solar-termica>. [Accedido: 15-feb-2021].
- [39] eba S.L., «La biomasa: producir energía con un sistema ecológico». [En línea]. Disponible en: [https://ebasl.es/en/producir-energia-con-la-biomasa/#:~:text=La energía de biomasa o,animales%2C entre otros\)%2C o](https://ebasl.es/en/producir-energia-con-la-biomasa/#:~:text=La energía de biomasa o,animales%2C entre otros)%2C o). [Accedido: 19-feb-2021].
- [40] Fundación Endesa, «Centrales de biomasa y sus tipos». [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa>. [Accedido: 19-feb-2021].
- [41] Foro Nuclear, «¿Qué es la energía geotérmica y cómo se aprovecha?» [En línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-la-energia-geotermica-y-como-se-aprovecha/>. [Accedido: 19-feb-2021].
- [42] COGEN Europe, «What Is Cogeneration?» [En línea]. Disponible en: <https://www.cogeneurope.eu/knowledge-centre/what-is-cogeneration>. [Accedido: 20-feb-2021].
- [43] Asociación Española de Cogeneración, «Cogeneración ¿Qué es?» [En línea]. Disponible en: <http://www.acogen.es/que-es.php>. [Accedido: 20-feb-2021].
- [44] X. Jaén González, Antoni; , Oliva Llena, Assensi; , Costa Perez, Miquel; Carreras Planells, Ramón; , Quera Miró, Manel; , Montserrat Ribas, Salvador; , Calventus Sole, Yolanda; , Casals Casanova, Miquel; , Colomer Vilanova, Pere; , Roca Ramon, *Tecnología energética y medio ambiente II*. Barcelona: Edicions UPC, 2016.
- [45] Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, «Generación de Energía a Partir Del Agua», *Sist. español gestión del agua*, pp. 1-26, 2016.
- [46] T. Burton, W. Wind, H. Rev, S. Swt-, T. G. Dam, y H. Dam, «Baseload power plant», 2008.
- [47] J. A. Gallego Marín, «Sistemas de Acumulación de Energía Eléctrica Para Centrales de Generación Hidráulicas Fluyentes», 2014.
- [48] J. Bogas Gálvez, «La energía nuclear en el marco de las fuentes energéticas», *Econ. Ind.*, n.º 369, pp. 75-86, 2008.
- [49] World Nuclear Association, «World Nuclear Performance Report», *World Nucl. Assoc.*, vol. 1, p. 32, 2018.
- [50] V. M. Fthenakis y H. C. Kim, «Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study», *Energy Policy*, vol. 35, n.º

4, pp. 2549-2557, 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2006.06.022.

- [51] Agilonline, «RENDIMIENTO DE CENTRALES ELECTRICAS», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.agilonline.com.ar/rendimiento-de-centrales-electricas/#:~:text=La eficiencia promedio de todas,más del 60%25 utilizando gas.> [Accedido: 23-feb-2021].
- [52] Parliamentary office of science and technology, «Carbon footprint of electricity generation», *Carbon N. Y.*, n.º 383, pp. 1-4, 2006.
- [53] EIA, «Electric Power Monthly», 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_6_07_a. [Accedido: 23-feb-2021].
- [54] A. Barrero, «Las emisiones de CO2 asociadas a la generación eléctrica registran en España un mínimo histórico en 2019», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.energias-renovables.com/panorama/las-emisiones-de-co2-asociadas-a-la-20200129>. [Accedido: 25-feb-2021].
- [55] T. Energías y C. C. Villacián, «Energías renovables. Energía y Telecomunicaciones», *Univ. Cantab.*, n.º lv.
- [56] J. A. Alonso Lorenzo, «Rendimiento de paneles solares». [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/rendimiento/>. [Accedido: 23-feb-2021].
- [57] C. Abele, «Sector solar térmico: rendimiento y radiación solar». [En línea]. Disponible en: <https://www.hogarsense.es/energía-solar/rendimiento-solar-termico#escala>. [Accedido: 23-feb-2021].
- [58] E. M. Puente Aranda, «GENERACIÓN ELÉCTRICA CON BIOMASA. EVOLUCIÓN DE LA RETRIBUCIÓN EN ESTE TIPO DE TECNOLOGÍA», Madrid, 2017.
- [59] EIA, «Electric Power Monthly», 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_6_07_b. [Accedido: 24-feb-2021].
- [60] IDAE, «Guía técnica para la medida y determinación del calor útil, de la electricidad y del ahorro de energía primaria de cogeneración de alta eficiencia», pp. 1-44, 2008.
- [61] M. de I. T. y Comercio, «Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo», *Boe*, pp. 1-41, 2007.
- [62] IEA, «Projected Costs of Generating Electricity 2020», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>. [Accedido: 23-feb-2021].
- [63] National Geographic, «¿Qué es el calentamiento global?» [En línea]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>. [Accedido: 17-feb-2021].
- [64] National Geographic, «What is global warming, explained». [En línea]. Disponible en:

- <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/global-warming-overview/>. [Accedido: 17-feb-2021].
- [65] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA, «Emisiones de CO2 asociadas a la generación de electricidad en España», p. 2, 2020.
- [66] A. Barrero, «La electricidad made in Spain es hoy un 30% menos sucia que hace solo cinco años». [En línea]. Disponible en: <https://www.energias-renovables.com/panorama/las-emisiones-del-sistema-electrico-espanol-descienden-20200608>. [Accedido: 01-mar-2021].
- [67] ree, «Red Eléctrica de España». [En línea]. Disponible en: <https://www.ree.es/es>.
- [68] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, «SOX (ÓXIDOS DE AZUFRE)». [En línea]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/SOx-oxidos-de-azufre,15598,11,2007.html>. [Accedido: 02-mar-2021].
- [69] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, «NOX (ÓXIDOS DE NITRÓGENO)». [En línea]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Oxidos-nitrogeno-769112007.html>. [Accedido: 02-mar-2021].
- [70] Grupo EDP, «Emisiones atmosféricas». [En línea]. Disponible en: <https://espana.edp.com/es/sostenibilidad/compromiso-ambiental/emisiones-atmosfericas#smog>. [Accedido: 02-mar-2021].
- [71] Foro Nuclear, «¿Cómo se gestionan los residuos radiactivos?» [En línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/como-se-gestionan-los-residuos-radiactivos/>. [Accedido: 02-mar-2021].
- [72] Sociedad Nacional de Minería petróleo y energía, «Potencia instalada, efectiva y firme», *Inf. Quinc. la snmpe*, vol. 1, 2019.
- [73] Comisión Europea, «Un Pacto Verde Europeo». [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es. [Accedido: 15-mar-2021].
- [74] C. R. Alberto Amores, Laureano Álvarez, Joaquín Chico, Gonzalo Ramajo, Miguel Sánchez, «Un modelo energético sostenible para España en 2050 Recomendaciones de política energética para la transición», *Deloitte Spain*, 2016.
- [75] Comisión Europea, «Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020». [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es#tab-0-0. [Accedido: 15-mar-2021].
- [76] MITECO, «Los ministros de Medio Ambiente de la UE cumplen con París al acordar el envío a la ONU de un objetivo de recorte de emisiones más ambicioso y dan luz verde a la tramitación de la Ley del Clima para alcanzar la neutralidad climática». [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/en/prensa/ultimas-noticias/los-ministros-de-medio-ambiente-de-la-ue-cumplen-con-paris-al-acordar-el-envio-a-la>

onu-de-un-objetivo-de-recorte-de-emisiones-más-ambicioso-y-d/tcm:38-520284. [Accedido: 15-mar-2021].

- [77] Comisión Europea, «Marco sobre clima y energía para 2030». [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es. [Accedido: 15-mar-2021].
- [78] MITECO, «Estrategia a Largo Plazo Para Una Economía Española Moderna, Competitiva Y Climáticamente Neutra En 2050», *Miteco*, p. 73, 2020.
- [79] MITECO, «Objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero». [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx>. [Accedido: 15-mar-2021].
- [80] MITECO, «Estrategia a Largo Plazo Para Una Economía Española Moderna, Competitiva Y Climáticamente Neutra En 2050. Anexos», *Miteco*, p. 179, 2020.
- [81] Expansión, «El Gobierno aprueba la última renovación de vida útil para la central nuclear de Almaraz», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.expansion.com/empresas/energia/2020/07/25/5f1bf2d9e5fdeaf56a8b45a3.html>. [Accedido: 15-mar-2021].
- [82] MITECO, «Energía nuclear», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>. [Accedido: 15-mar-2021].