



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Organización Industrial**

# **Análisis económico y medioambiental de la energía nuclear**

**Autor:**

**Cesarz, Karolina Maria**

**Tutor:**

**Araúzo, José Alberto**

**Organización de Empresas y CIM**

**Valladolid, Julio 2023**



## Agradecimientos

Deseo expresar mi total gratitud hacia mis padres, quienes siempre han estado a mi lado brindándome apoyo y creyendo en mí incluso en los momentos en que yo misma dudaba. Su constante respaldo ha sido fundamental para mi desarrollo personal.

Mamá, gracias por estar presente en los momentos en los que más te he necesitado, por preguntarme sin falta después de cada examen si estaba orgullosa de como lo había hecho. Tu interés y amor incondicional me motivan a seguir esforzándome.

Y papá, gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la determinación. Me has demostrado que no hay límites cuando se trata de alcanzar metas y que con trabajo duro se puede lograr cualquier objetivo.

Asimismo, quisiera agradecer a mis amigos por su paciencia y comprensión durante estos últimos meses, en los que solo me han escuchado hablar de la energía nuclear. Su apoyo incondicional y disposición para escucharme han sido un gran estímulo.

Agradezco a mi tutor José Alberto Arúzo su tiempo y por guiarme a lo largo del proceso de elaboración de este Trabajo Fin de Grado. Su experiencia y orientación han sido fundamentales para dar forma a este proyecto.

Por último, pero no menos importante, agradezco a todos los docentes que me han acompañado a largo de mi formación académica y han conseguido que me fascinen temas que nunca me hubiese imaginado que llegaría a encantarme.

Gracias a todos por contribuir a mi crecimiento personal y profesional. Vuestra presencia y apoyo han sido invaluable y han dejado una huella imborrable en mí.

*Dziękuję mamę i tato.*

Karolina



## Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado consiste en la elaboración de un análisis tanto económico como medioambiental de la energía nuclear.

La energía nuclear ha sido objeto de controversia y preocupación en la sociedad debido a los riesgos asociados a la seguridad, la proliferación nuclear y la gestión de los residuos radiactivos.

En este documento, se llevará a cabo una evaluación detallada de las ventajas y desventajas de esta tecnología energética, con el propósito de determinar si constituye una fuente de energía sostenible, segura y económicamente viable para contribuir efectivamente a la descarbonización.

Se buscará obtener una breve descripción de la tecnología nucleoelectrónica tanto actual como futura, evaluar económicamente esta tecnología y evaluar el impacto medioambiental desde una perspectiva puramente técnica y sin introducir ningún riesgo para esclarecer el impacto global de esta tecnología.

## Palabras clave:

Energía nuclear, análisis económico, análisis medioambiental, sostenibilidad, descarbonización.

## Abstract

This Final Degree Project consists of an economic and environmental analysis of nuclear energy.

Nuclear energy has been the subject of controversy and concern in society due to the risks associated with safety, nuclear proliferation, and radioactive waste management.

In this paper, a detailed assessment of the advantages and disadvantages of this energy technology will be carried out in order to determine whether it constitutes a sustainable, safe and economically viable energy source to effectively contribute to decarbonization.

It will seek to provide a brief description of both current and future nuclear power technology, an economic assessment of this technology and an environmental impact assessment from a purely technical perspective and without introducing any risk in order to clarify the overall impact of this technology.

## Keywords:

Nuclear energy, economic analysis, environmental analysis, sustainability, decarbonization.





# Contenido

Capítulo 1. Introducción y objetivos.....	7
1.1. Justificación.....	7
1.2. Objetivos.....	8
1.3. Contenido del documento .....	9
Capítulo 2. La energía nuclear .....	11
2.1. Situación actual de la energía nuclear.....	11
2.2. Energía nuclear en Europa .....	16
2.2.a Energía nuclear en España.....	17
2.3. Funcionamiento de una central térmica nuclear de fisión .....	20
2.4. Principales reactores nucleares en fase comercial .....	24
2.4.a Reactor de agua a presión (PWR) .....	25
2.4.b El reactor de agua en ebullición (BWR) .....	29
2.4.c Reactor de agua pesada a presión (PHWR) .....	30
2.4.d Reactor refrigerado por gas avanzado (AGR).....	31
2.5. El futuro de la fisión nuclear. Los reactores de cuarta generación .....	33
2.6. El futuro de la energía nuclear. La fusión nuclear .....	37
2.7. Tabla resumen reactores nucleares.....	40
Capítulo 3. Análisis económico .....	43
3.1. Inversión inicial .....	44
3.2. Gastos de explotación .....	50

3.4. El LCOE de la energía nuclear.....	54
Capítulo 4. Análisis medioambiental .....	57
4.1. Las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales nucleares .....	59
4.2. Consumo de recursos naturales.....	72
5.4.a Transformación del uranio en combustible nuclear y su gestión ...	75
5.4.b El torio .....	81
4.3. Los residuos nucleares .....	84
4.3.a Clasificación de los residuos radiactivos.....	84
4.3.b Las paradas de recarga .....	85
4.3.c Almacenamiento de los residuos nucleares con seguridad.....	87
4.4. Seguridad nuclear y el riesgo de accidentes .....	90
4.5. Impacto en la sociedad y biodiversidad.....	101
4.6. Los objetivos del desarrollo sostenible y las ESG .....	105
Capítulo 5. Conclusiones .....	109
Anexos.....	111
Anexo1. La fisión nuclear.....	111
Anexo 2. La radioactividad y radiación recibida por la población.....	112
Bibliografía.....	117

# Índice de figuras

Figura 1. Electricidad producida por 1 kilogramo de combustible (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).....	14
Figura 2. Equivalencias energéticas de distintos tipos de materias primas (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023) .....	15
Figura 3. Reactores en Europa (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023) .....	17
Figura 4. Estructura de la generación de la energía eléctrica por tecnologías en España en el año 2023 (Red Eléctrica Española, 2023).....	19
Figura 5. Esquema básico de una central nuclear (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).....	21
Figura 6. Esquema básico del funcionamiento de una central con una PWR (García Fernández, 2022) .....	26
Figura 7. Esquema de un reactor PWR (Asociación Nuclear Ascó Vandellós II A.I.E., 2023).....	28
Figura 8. Central Nuclear de Cofrentes en Valencia (Energy Encyclopedia, 2023) .....	29
Figura 9. Esquema básico de una central nuclear con un reactor BWR (Energy Encyclopedia, 2023) .....	30
Figura 10. Esquema básico de una central nuclear con un reactor PHWR (Energy Encyclopedia, 2023) .....	31
Figura 11. Reactor refrigerado por gas avanzado (World Nuclear Association, 2023).....	32
Figura 12. Coste de una central nuclear en función de los reactores operativos del mismo tipo (Shirvan, 2022) .....	45
Figura 13. Tiempo de construcción de las centrales nucleares en Francia entre 1956 y 1991 (Lovering J. R., Yip A., & Nordhaus A., 2016).....	48
Figura 14. Evolución del precio de los reactores franceses entre 1956 y 1991 (Lovering J. R., Yip A., & Nordhaus A., 2016) .....	49
Figura 15. Precio total del combustible nuclear (World Nuclear Association, 2022).....	50
Figura 16. Evolución de los impuestos de las centrales nucleares en España (Energía y Sociedad, 2021).....	52
Figura 17. LCOE de las distintas tecnologías energéticas en 2023 (Lazard, 2023).....	54

Figura 18. LCOE de las distintas tecnologías energéticas. (International Energy Agency, 2020) .....	55
Figura 19. Smog en la ciudad de Madrid (García Gallo, 2013).....	59
Figura 20. Emisiones de los gases de efecto invernadero en el año 2016 (Our world in data, 2023) .....	60
Figura 21. Emisiones de los gases de efecto invernadero (Our world in data, 2023).....	61
Figura 22. Emisiones gases de efecto invernadero por sector en e laño 2016 (El Orden Mundial, 2023).....	63
Figura 23. Origen de la consumición global de la energía primaria (Our world in data, 2023).....	63
Figura 24.Emisiones de gases de efecto invernadero y ratio de muertes de las fuentes de energía primarias (Our world in data, 2023).....	64
Figura 25. Emisiones de dióxido de carbono del ciclo de vida de las distintas tecnologías energéticas (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).....	65
Figura 26. Producción de energía eléctrica en Polonia, junio 2023 (CIRE PL, 2023).....	67
Figura 27. Producción de energía eléctrica en Francia, 16 de junio del 2023 (RTE France, 2023).....	69
Figura 28. Origen de la energía consumida en Francia año 2021 (Notre-Environment, 2023).....	69
Figura 29.Importaciones y exportaciones de energía en Francia año 2021 (RTE France, 2023).....	70
Figura 30. Consumo y generación de electricidad en Francia. Fuente: Datos Macro .....	70
Figura 31.emisiones de c02 en Francia. Fuente: Datos Macro.....	70
Figura 32. Reservas del uranio en el mundo (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).....	73
Figura 33. Ciclo de vida del combustible nuclear.....	75
Figura 34. Difusión gaseosa del hexafluoruro de uranio (Energy Encyclopedia, 2023) .....	77
Figura 35. Centrifugación gaseosa del hexafluoruro de uranio .....	77
Figura 36. Etapas de la fabricación de los elementos combustibles (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).....	78

Figura 37. Esquema de la segunda parte del ciclo de vida del combustible nuclear (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).....	80
Figura 38. Desintegración del Torio en combustible nuclear (García Fernández, 2022).....	81
Figura 39. El efecto de Cherenkov. Fuente: Foro Nuclear .....	87
Figura 40. Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES) (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023). .....	93
Figura 41. Esquema de la fisión nuclear.....	111
Figura 42. Tipos de radiación.....	113
Figura 43. Origen de la radiación recibida (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023).....	114

## Índice de tablas

Tabla 1. Reactores de cuarta generación .....	35
Tabla 2. Resumen reactores nucleares.....	40
Tabla 3. Evolución precios de los reactores según el gigavatio en Francia.....	49
Tabla 4. Gasto de operación y mantenimiento de un reactor (Shirvan, 2022) .....	53



# Capítulo 1.

# Introducción y

# objetivos

## 1.1. Justificación

En la actualidad, la humanidad debe enfrentarse a un desafío sin precedentes, la actividad humana ha tenido varias consecuencias negativas sobre el planeta, siendo una de ellas el aumento medio de la temperatura, conocido como calentamiento global. Este fenómeno se atribuye principalmente a la emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo, no solo debemos considerar las emisiones del CO<sub>2</sub>, sino también el aumento de gases y otras partículas contaminantes presentes en la atmósfera, los cuales empeoran la calidad de vida de los seres vivos y tienen consecuencias perjudiciales para la salud.

Toda actividad humana supone una alteración del ecosistema, las tecnologías energéticas no son una excepción, estas tienen un impacto negativo en el medio ambiente, todas generan emisiones de CO<sub>2</sub> y residuos en algún momento a lo largo de su ciclo de vida. En el caso de la energía nuclear, esta no produce emisiones a lo largo de su ciclo de operación, pero sí durante la minería, el transporte, la construcción y durante las pruebas de seguridad de los generadores diésel de emergencias. No obstante, las emisiones de CO<sub>2</sub> de la energía nuclear son equiparables a las emitidas por fuentes de energía renovables.

Todos los países están afrontando una transición hacia un modelo energético sostenible y respetuoso con el medio ambiente, para paliar la emergencia climática y realizar una descarbonización efectiva a la vez que deben garantizar

un suministro de electricidad que cubra la demanda existente y la futura demanda que no dejará de aumentar. Para lograrlo deben emplearse fuentes de energía libres de emisiones de gases de efecto invernadero para minimizar la emisión de estos gases a la atmósfera.

Las energías renovables tienen ciertas limitaciones a la hora de satisfacer la demanda de electricidad, estas dependen de factores meteorológicos que no pueden ser controlados por el hombre, por ello deben ser apoyadas por una energía base que ayude a la estabilidad del sistema eléctrico, satisfaciendo la demanda en los momentos donde las renovables no puedan hacerlo. Principalmente se emplean los combustibles fósiles para apoyar a las renovables, los cuales son los más contaminantes. Para poder reducir las emisiones de gases invernadero y cumplir con el acuerdo de París de 2015 deben abandonarse los combustibles fósiles.

En este presente trabajo voy a exponer la situación actual de las centrales nucleares. La energía nuclear utilizada hoy en día es la de fisión, esta es una fuente de energía con bajas emisiones, ayuda a disminuir la dependencia energética externa y genera electricidad de manera prácticamente continua. La energía nuclear posee diversas ventajas y desventajas, las cuales se van a exponer para ofrecer una perspectiva más clara sobre si constituye una buena energía base, para apoyar a las energías renovables, con el objetivo de mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este presente Trabajo Fin de Grado es realizar un análisis económico y medioambiental de la energía nuclear.

En primer lugar, el objetivo es exponer la situación actual de la energía nuclear en el mundo, la prospectiva tecnológica y el funcionamiento básico de una central nuclear.

En segundo lugar, el objetivo es analizar los costes en los que se incurre para poner una central nuclear en marcha y los gastos durante su ciclo de operación.

En tercer lugar, el objetivo es analizar el impacto medioambiental de la energía nuclear, considerando el uso de los recursos naturales, la gestión de los residuos, las emisiones de dióxido de carbono, la seguridad, el impacto en la sociedad y la biodiversidad.

Por último, el objetivo es brindarle al lector un análisis documental amplio sobre la energía nucleoelectrica sin introducir ningún sesgo referente a esta tecnología tan controvertida.

## 1.3. Contenido del documento

Este Trabajo de Fin de Grado se presenta con una estructura definida que se divide en cinco secciones principales:

Capítulo 1. Introducción y objetivos: Fija las justificaciones y los objetivos que se persiguen en el desarrollo del documento.

Capítulo 2. La energía nuclear: Muestra la situación actual de la energía nuclear en el mundo, describiendo el funcionamiento básico de una central nuclear. Describe de forma breve la tecnología actual y las investigaciones que se están llevando a cabo.

Capítulo 3. Análisis económico: Describe las inversiones necesarias para poner una central nuclear en funcionamiento y los diferentes gastos de explotación.

Capítulo 4. Análisis medioambiental: Muestra el impacto de la energía nuclear en el medioambiente, analizando las emisiones de CO<sub>2</sub>, además de su impacto en la sociedad y la biodiversidad. También describe la seguridad de estas centrales y la gestión de los residuos radiactivos. Para finalizar se describe la contribución de la energía nuclear para lograr los objetivos del desarrollo sostenible.

Capítulo 5. Conclusiones: Presenta las conclusiones extraídas tras la realización del TFG.

Capítulo 6. Bibliografía: Recopila todas las fuentes consultadas para la elaboración del trabajo.

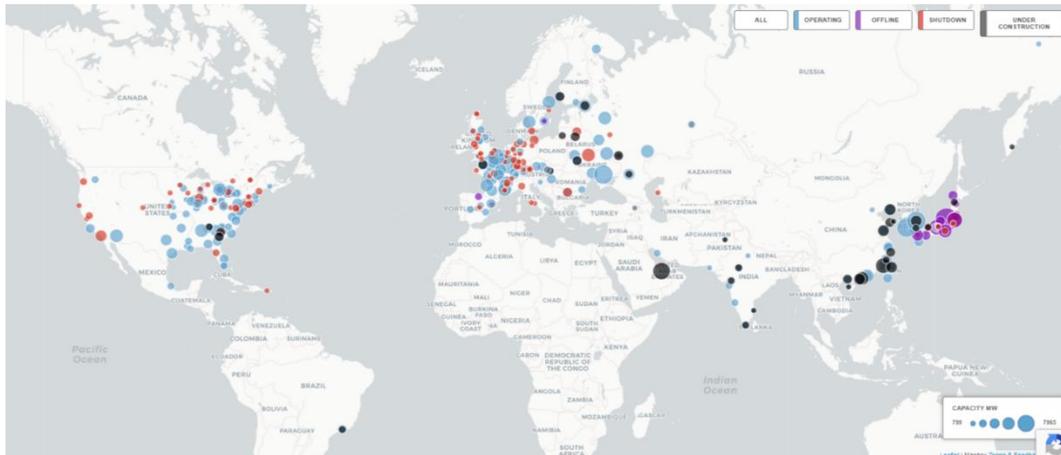


# Capítulo 2. La energía nuclear

## 2.1. Situación actual de la energía nuclear

La energía nuclear es una fuente de energía confiable y sostenible, garantiza el abastecimiento eléctrico y no emite gases de efecto invernadero a la atmósfera. Su implementación ayuda a reducir la dependencia energética del exterior y ofrece la capacidad de producir electricidad de forma continua asegurando el suministro. Cada vez son más los países que apuestan por esta tecnología, algunos de los cuales están en proceso de construir sus primeras centrales nucleares, mientras que otros amplían la vida útil de sus reactores hasta los 60 u 80 años además de invertir en la construcción de nuevas plantas y reactores nucleares. Estados Unidos ha sido el pionero en otorgar autorizaciones para que sus reactores operen durante 80 años, demostrando así su confianza en la capacidad de la energía nuclear para proporcionar un suministro energético a largo plazo.

Una central nuclear es instalación industrial donde se lleva a cabo la generación de electricidad a través de la reacción de fisión que ocurre en su reactor, en el Anexo 1 se describe de forma detallada la fisión nuclear. Esta reacción se lleva a cabo de forma controlada y eficiente permitiendo la liberación de una cantidad significativa de energía en forma de calor.



Mapa 1. Centrales nucleares en el mundo en el año 2016 (Carbon Brief, 2016)

En el mapa 1 se muestran todas las centrales nucleares en el mundo en el año 2016 utilizando diferentes colores para indicar su estado. Las centrales en funcionamiento se muestran en color azul, aquellas fuera de servicio en color rojo y las centrales en construcción en color gris.

En el mundo hay 33 países que disponen de plantas de energía nuclear. Se encuentran en operación más de 400 reactores nucleares, suministrando alrededor del 11% de la electricidad consumida en el planeta. Según los datos de diciembre de 2022 del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) hay 58 reactores en construcción distribuidos en 18 países. China destaca por ser el país con mayor número de reactores en construcción, este hecho en parte se atribuye a la crisis energética que han experimentado el gigante asiático. China cuenta con 55 unidades operativas y 19 en construcción (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).

Nos encontramos con algunos países que están dando sus primeros pasos en la implementación de centrales nucleares o tienen planes para hacerlo en un futuro cercano. Algunos de estos países incluyen a Egipto, Turquía, Bangladesh y Polonia, quienes se encuentran en el proceso de construcción de sus primeras plantas nucleares o tienen planes concretos para comenzar dicha construcción en los próximos años.

En Europa, se encuentran en operación 103 reactores nucleares, mientras que en América hay 132, en África hay 2 y en Asia hay 132. Es importante destacar que Asia es el continente que está mostrando un mayor impulso hacia la energía nuclear, con 40 unidades en proceso de construcción (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).

La energía es un factor esencial para el bienestar del ser humano y el desarrollo económico sostenible, todas las fuentes de energía presentan ventajas e inconvenientes, al igual que un impacto negativo en el medioambiente a lo

largo de su ciclo de vida. La energía nuclear destaca por ser una fuente de energía libre de emisiones de dióxido de carbono y puede jugar un papel importante contra el cambio climático, generando grandes cantidades de energía eléctrica sin contaminar la atmósfera. Gracias a las características favorables de esta tecnología, esta se encuentra en el punto de mira en la actualidad, mientras muchos países apuestan por su implementación, existen otros que se oponen a su uso. Esta tecnología genera en la sociedad controversia, preocupación y en algunos casos miedo, existen muchos movimientos activistas que se posicionan en su contra.

Es importante destacar que, si bien la energía nuclear se considera parcialmente una fuente de energía limpia debido a que no emite gases de efecto invernadero durante su proceso de generación, esta origina residuos radiactivos que deben ser gestionados y almacenados de manera adecuada. La gestión segura de estos residuos es un aspecto fundamental para garantizar la sostenibilidad y la seguridad de la energía nuclear como fuente energética, la gestión de los residuos se describe en el capítulo 4.3.

La extensión de la vida operativa de las centrales nucleares o la continuidad de las operaciones nucleares se refiere a la práctica de mantener en funcionamiento una central más allá del período inicialmente establecido en su diseño, asegurando en todo momento el cumplimiento de los estándares de seguridad. Según los datos proporcionados por el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) en 2022, se han otorgado autorizaciones para operar más allá de los 40 años a un total de 191 reactores nucleares en todo el mundo. Entre los países con un mayor número de reactores nucleares autorizados para operar a largo plazo se encuentran Estados Unidos y Francia (Organismo Internacional de la Energía Atómica , 2021).

Estos países han demostrado la capacidad de cumplir con los requisitos de seguridad y eficiencia necesarios para garantizar la continuidad de las operaciones de sus reactores nucleares. Cabe destacar que cada reactor es evaluado de manera individual, considerando aspectos específicos de seguridad y eficiencia, para determinar si cumple con los criterios necesarios para su operación prolongada. Este proceso de análisis riguroso y evaluación continua permite asegurar que los reactores nucleares mantengan altos estándares de seguridad y funcionamiento eficiente a lo largo de su vida operativa extendida. La extensión de la vida útil de las centrales nucleares contribuye a maximizar la inversión realizada en infraestructuras nucleares y garantizar una fuente confiable de energía eléctrica, siempre y cuando se cumplan con los requisitos y regulaciones establecidos en cada país (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).

Los programas y las instalaciones nucleares en todo el mundo están sujetos a la supervisión y control de los organismos reguladores nacionales, así como del

OIEA a nivel internacional. El OIEA es una organización especializada que promueve la cooperación en el campo de la energía nuclear. Desde su creación en 1957, ha trabajado en colaboración con sus Estados miembros y socios en todo el mundo para fomentar el uso seguro y pacífico de las tecnologías nucleares.

Desde 1981, el OIEA publica anualmente el reporte *Nuclear Power Reactors in the World*, el cual proporciona información actualizada sobre el estado de los programas nucleares en diferentes países. Este informe detalla el número de países que operan centrales nucleares, aquellos que están construyendo nuevas instalaciones o considerando la opción de construir nuevas plantas o reactivar proyectos de construcción suspendidos. También se incluye información sobre los tipos de centrales nucleares en operación. Además, el informe proporciona datos sobre la contribución de la energía nuclear a la generación de electricidad en cada país y presenta proyecciones sobre la capacidad futura de generación de energía nuclear. Estas publicaciones son una fuente importante de información para verificar el estado y el desarrollo de la energía nuclear a nivel mundial, así como para evaluar la contribución de la energía nuclear en el panorama energético global. Además, reflejan los esfuerzos y la cooperación internacional en la promoción del uso responsable y seguro de la energía nuclear.

La energía nuclear destaca por ser muy eficiente, es una energía muy densa energéticamente, puede producir grandes cantidades de energía eléctrica a partir de una cantidad pequeña de combustible. En la Figura 1 se muestran los kilovatios hora (kWh) generados por un kilo de carbón, gas natural y por último de uranio. Un kilogramo de uranio tiene la capacidad de producir más de 1.600.000 veces la cantidad de electricidad generada por un kilo de gas natural.

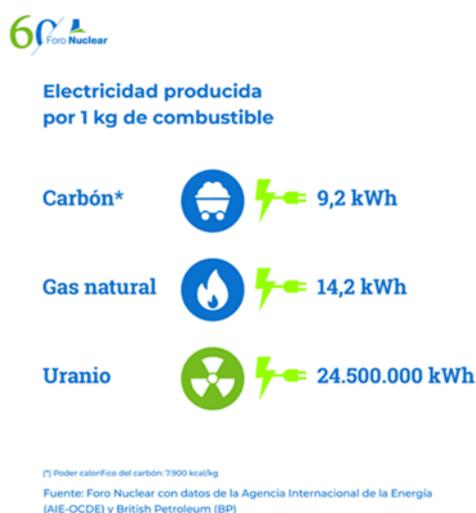


Figura 1. Electricidad producida por 1 kilogramo de combustible (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)

Esta diferencia significativa en la densidad energética entre el uranio y los combustibles fósiles señalan la eficiencia y la capacidad de generación de energía de la tecnología nuclear. Además, esta característica permite un uso más eficiente de los recursos naturales y contribuye a una mayor producción de energía eléctrica con una menor cantidad de combustible. La energía nuclear se presenta como una opción atractiva para satisfacer la demanda creciente de electricidad de manera sostenible y con una menor huella ambiental.

En la Figura 2 se observan las equivalencias entre diferentes tipos de materias primas. Al ser el uranio más denso energéticamente que los combustibles fósiles una cantidad muy pequeña de uranio equivale a grandes cantidades de combustibles fósiles.



*Figura 2. Equivalencias energéticas de distintos tipos de materias primas (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)*

Esta ventaja en la densidad energética del uranio en comparación con los combustibles fósiles es una de las razones por las cuales la energía nuclear se considera una opción atractiva para satisfacer las necesidades de energía de manera eficiente y sostenible, evitando el uso de los combustibles fósiles y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Una central nuclear no solo es capaz de producir gran cantidad de energía con cantidades reducidas de combustible sino también es capaz de producir energía de forma prácticamente continua, solo es necesario interrumpir su funcionamiento para realizar las recargas del combustible, en estas paradas también se realizan las tareas de mantenimiento de la central. Esta cualidad brinda estabilidad al suministro eléctrico. Las paradas de recarga se detallan en el capítulo 4.3.

Figure 1.1. Global distribution of identified resources  
(<USD 130/kgU as of 1 January 2019)



Mapa 2. Mapa de las reservas de uranio y su localización (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)

En el mapa 2 se observa la distribución de las reservas de uranio en el mundo. Según la 28 Edición del Libro Rojo del Uranio existen suficientes reservas de uranio para el uso a largo plazo de la energía nuclear, se estima que las reservas existentes puedan suministrar de forma confiable suficiente uranio para mantener el parque nuclear mundial durante un siglo (Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency, 2020).

## 2.2. Energía nuclear en Europa

En la Unión Europea 13 de los 27 Estados miembros cuentan con centrales nucleares. Hay un total de 103 reactores en operación que producen el 26% del total de la electricidad consumida en el conjunto de la UE. Actualmente se están construyendo reactores nuevos en Francia y Eslovaquia (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).

Francia cuenta con 56 reactores en operación, es el país con más reactores nucleares de la UE. Más del 70% de la energía producida por Francia es de origen nuclear, es el porcentaje más alto de todo el mundo. A este porcentaje le siguen Ucrania, Eslovaquia, Bélgica y Hungría dentro de la UE.

En la Figura 3 se muestra el gráfico de los reactores operativos en Europa y los que se encuentran en construcción.

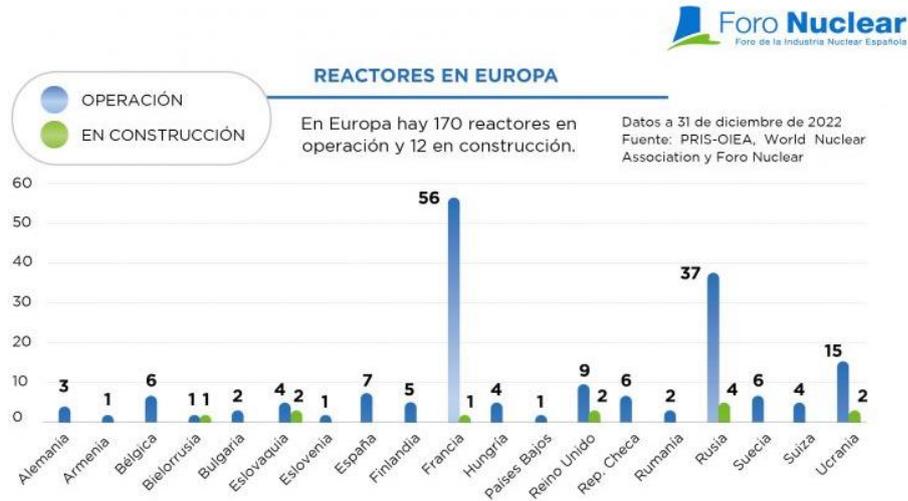


Figura 3. Reactores en Europa (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)

Alemania ha sido el primer país europeo en renunciar a la energía nuclear, España y Bélgica también tienen programado un apagón nuclear.

## 2.2.a Energía nuclear en España

La primera central nuclear construida en España fue la de José Cabrera en la década de 1960, dando comienzo al programa nuclear en el país.

Actualmente España cuenta con cinco centrales nucleares y siete reactores en operación. Ascó (Tarragona) y Almaraz (Cáceres) cuentan con dos reactores, mientras que Trillo (Guadalajara), Vendellós (Tarragona) y Cofrentes (Valencia) solo cuentan con un reactor. Estas centrales nucleares comenzaron su operación comercial en la década de 1980. En España también se localiza una fábrica de combustible nuclear en Salamanca y un centro de almacenamiento de residuos radiactivos de baja y media actividad en Córdoba (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).



*Mapa 3. Centrales nucleares españolas (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)*

En el mapa 3 se observa la localización de las centrales nucleares españolas.

El parque nuclear español cuenta con una potencia bruta instalada de 7.398,77 megavatios (MW), la novena mayor del mundo. Las empresas propietarias de estas centrales nucleares principalmente son Iberdrola, Endesa y Naturgy (Consejo de Seguridad Nuclear, 2023).

El funcionamiento de las centrales nucleares en España ha estado en constante debate en los últimos años. En 2018, se aprobó el cierre escalonado de todas las centrales nucleares españolas, por lo que se espera que se vayan cerrando progresivamente a partir del año 2027, tras cumplir los 40 años de vida útil. En España se está trabajando en una transición hacia un modelo energético más sostenible y basado en energías renovables donde la nuclear no tiene cabida (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).

La primera central nuclear en ser cerrada será Almaraz I en el 2027, posteriormente se irán cerrando el resto hasta llegar a Vandellós II en año 2035. Estos plazos están sujetos a posibles modificaciones que dependen del Gobierno, la legislación española no determina el tiempo de funcionamiento máximo de una central nuclear. Los plazos de la autorización de operación de estas centrales expiran en las fechas determinadas para el cierre de las mismas.

## ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN POR TECNOLOGÍAS (%) | SISTEMA ELÉCTRICO: Nacional

Del 01/2023 al 06/2023

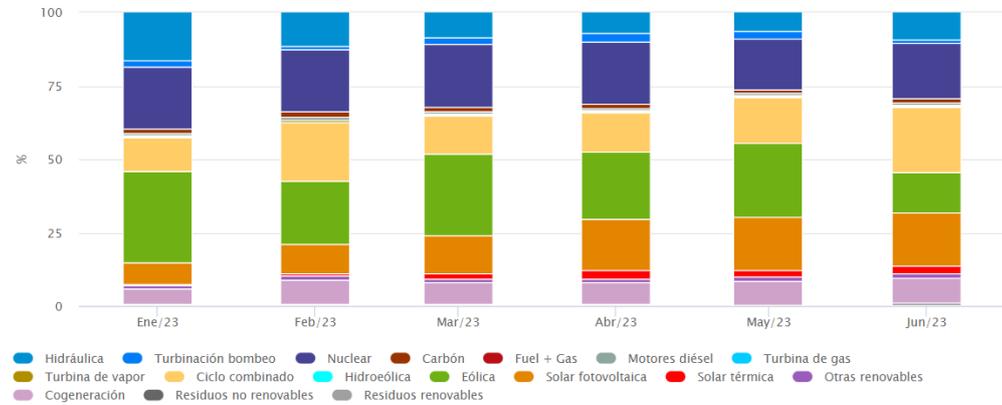


Figura 4. Estructura de la generación de la energía eléctrica por tecnologías en España en el año 2023 (Red Eléctrica Española, 2023)

En la Figura 4 se presenta la estructura de generación de la energía eléctrica en función de las diferentes tecnologías en 2023 a nivel nacional. La energía nuclear representa aproximadamente el 20% de la electricidad producida en España, dependiendo del mes y de la producción de las renovables puede aumentar o disminuir. Las centrales nucleares ofrecen estabilidad a la red eléctrica, garantizan el suministro eléctrico durante 24 horas los 365 días del año. La nuclear es la tecnología que más horas opera en el sistema eléctrico, unas 8000 horas de las 8760 horas que tiene el año (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).

La energía nuclear, la energía eólica y el ciclo combinado son las tecnologías que mayor porcentaje representan en el mix de generación de energía. En los meses donde el aporte de las energías renovables se reduce aumenta el uso de los combustibles fósiles y la energía nuclear.

En España las centrales nucleares operan de forma segura bajo las regulaciones del Consejo de Seguridad Nuclear (CNS).

## 2.3. Funcionamiento de una central térmica nuclear de fisión

Una central nuclear es una instalación industrial que produce electricidad a través de la liberación de energía nuclear. Es una central térmica en la que el vapor de agua hace girar los álabes de una turbina, este vapor en vez de proceder de una combustión como las centrales tradicionales proviene de la fisión del núcleo de ciertos elementos pesados, especialmente el uranio y el plutonio. La fisión nuclear se explica en detalle en el Anexo 1.

La mayor parte de las centrales nucleares utilizan el uranio como combustible. El uranio está formado básicamente por dos isótopos, 99,3% de U-238 y 0,7% de U-235, para poder usarlo en las centrales nucleares es necesario enriquecerlo mediante un proceso industrial, aumentando el porcentaje del isótopo U-235, el ideal para fisiónar, hasta del 5%. También se puede emplear combustible reciclado MOX, se trata de una mezcla de óxidos de uranio y plutonio. El uso de los recursos naturales se explica en el capítulo 4.2.

El funcionamiento básico de una central nuclear es muy sencillo, aunque es una instalación muy compleja tecnológicamente donde intervienen múltiples mecanismos físicos y químicos. El funcionamiento y el número de circuitos hidráulicos principales puede variar de unos diseños a otros. Lo más habitual es que las centrales nucleares cuenten con tres circuitos hidráulicos.

El reactor nuclear es el componente principal de la planta y es donde se lleva a cabo la fisión nuclear de forma segura y controlada. Contiene el combustible nuclear, así como sistemas que permiten controlar la reacción en cadena de manera segura, estos son las barras de control y el moderador, los cuales ralentizan los neutrones. Para controlar la potencia del reactor se pueden introducir las barras de control o variar la concentración de ácido bórico en el circuito primario. Las barras de control están formadas principalmente por boro y cadmio. El boro es un absorbente eficaz de los neutrones liberados en la fisión.

El calor resultante de la fisión calienta el agua del circuito primario, este a su vez intercambia calor con el circuito secundario para producir vapor y mover la turbina. Esta energía mecánica de la turbina es transformada en energía eléctrica gracias al alternador. Una vez convertida la energía eléctrica en alta tensión es distribuida a través de la red de transporte.

El vapor del circuito secundario sale de la turbina e intercambia calor con el circuito terciario, hasta volver a su estado inicial de agua líquida sobrecalentada. El agua del circuito terciario procede de algún río, lago o mar,

esta agua no se puede ser vertida a su lugar de procedencia con una temperatura elevada, la normativa obliga a enfriarla para no contaminar el medio.

En la Figura 5 se muestra el esquema básico de una central nuclear con sus elementos más importantes.

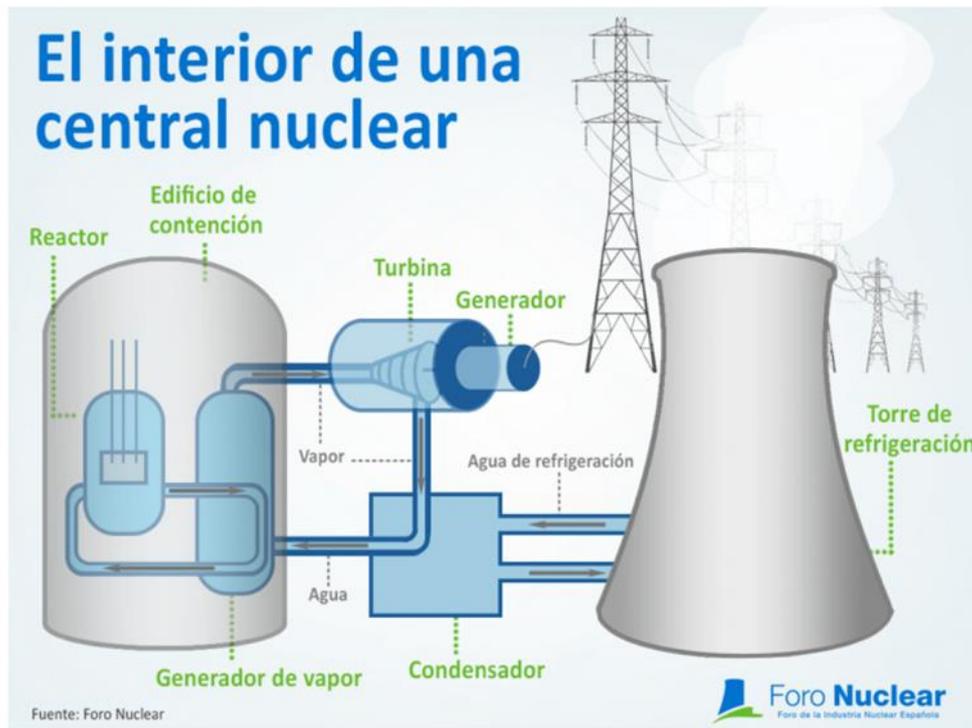


Figura 5. Esquema básico de una central nuclear (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)

Una central nuclear está compuesta por varios edificios que trabajan de forma conjunta, separar los componentes de la central en varios edificios también es una medida de seguridad. Los que más interés generan son el de contención, combustible, turbinas, control y generadores diésel.

El edificio de contención alberga al reactor, los generadores de vapor, el presionador o presurizador, los equipos del circuito primario, así como sistemas auxiliares y parte de los equipos de emergencias. El reactor es el corazón de la central nuclear, es un recipiente de acero de aproximadamente 10 metros de altura. El núcleo del reactor tiene una altura de 3,5 metros y un diámetro de 4,5 metros. Las dimensiones pueden variar ligeramente entre los distintos diseños.

En el edificio de combustible es donde se almacena el combustible nuevo, el cual llega a la central nuclear unas semanas antes de la parada programada

de recarga del combustible, según el diseño de la central nuclear la piscina de combustible usado puede alojarse en este edificio o en el de contención. Las piscinas de combustible se describen en el capítulo 4.3.

El edificio de control es el puente de mando de la central, desde aquí los operadores nucleares controlan y supervisan el funcionamiento de la planta.

Por último, el edificio de los generadores diésel, estos son muy importantes debido a que en caso de emergencia mantienen el reactor refrigerado, controlando la reacción de fisión.

A continuación, voy a dar una breve descripción de los componentes más relevantes.

- Edificio de contención. Se caracteriza por ser una estructura abovedada construida con hormigón armado reforzado. Su objetivo principal es proteger tanto al entorno exterior de la radiación como a los componentes internos de la central nuclear de los posibles eventos que puedan ocurrir en el exterior.
- Reactor. Es el componente principal de la central nuclear y es lo que distingue de una central térmica convencional. En el reactor se inician, mantienen y controlan las reacciones de fisión en cadena, que producen la energía térmica necesaria para la generación de energía eléctrica.
- El reactor consta de una vasija de acero en cuya interior se aloja el combustible nuclear.
- Combustible. El combustible es el material donde ocurre la reacción de fisión en cadena, siendo comúnmente utilizado el dióxido de uranio enriquecido. Este combustible se introduce en el reactor en forma de pellets, que son pastillas cilíndricas de material sólido. Los pellets se insertan en varillas metálicas que pueden llegar a tener una longitud de hasta cuatro metros.
- Moderador. El moderador, generalmente agua, tiene la función de reducir la velocidad de los neutrones rápidos generados durante la fisión. Esto posibilita nuevas fisiones y el mantenimiento de la reacción en cadena.
- Refrigerante. Es el mismo agua que cumple con las funciones de moderador y extracción del calor generado por la reacción de fisión.
- Barras de control. Las barras de control son elementos clave para el control del reactor, ya que actúan como absorbentes de neutrones. Estas barras, fabricadas con indio, cadmio o carburo de boro, permiten regular en todo momento el número de neutrones presentes y mantener así la reacción de forma estable. También se utilizan para detener el reactor en caso necesario.

- Blindaje. El blindaje tiene como finalidad prevenir la fuga de radiación hacia el exterior. Por lo general, se emplean materiales como hormigón, acero o plomo.
- Elementos de seguridad. Las centrales nucleares disponen de múltiples sistemas de seguridad diseñados para imposibilitar la liberación de radiación al medio ambiente.
- Presionador. El presionador es un componente del circuito primario que se encarga de mantener un equilibrio entre la fase líquida y la fase de vapor en condiciones de saturación, permitiendo así el control de la presión en el circuito.
- Generador de vapor. Son intercambiadores de calor en los cuales el agua del circuito primario cede su energía térmica al agua del circuito secundario, provocando así la transformación del agua en vapor
- Turbina. Es una instalación que recibe el vapor proveniente de los generadores de vapor, cuya energía cinética se transforma, a través de los álabes, en energía mecánica de rotación. Estas turbinas pueden llegar a tener hasta 70 metros de longitud y contener varias etapas. La primera etapa es la de alta presión, que es impulsada directamente por el vapor. Después el vapor se precalienta y se suministra a una etapa de baja presión que tiene aspas más largas. La turbina gira a una velocidad de 3.000 rpm y acciona el generador.
- Generador o alternador. Es un dispositivo que transforma la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica.
- Transformador. Es un dispositivo que eleva la tensión de la electricidad producida con el fin de minimizar las pérdidas en su transporte de larga distancia hasta los puntos de consumo.
- Torre de refrigeración. Es una estructura que permite disipar una parte del calor residual del circuito de refrigeración hacia la atmósfera, la cual actúa como foco frío.
- Condensador. Se utiliza para enfriar el vapor procedente de la turbina, transformándolo nuevamente en agua.
- Circuito de refrigeración. Utiliza agua procedente de fuentes como río, lago o mar, cuya función es intercambiar calor con el circuito secundario a la salida de la turbina para devolverlo a estado líquido.

## 2.4. Principales reactores nucleares en fase comercial

En la industria nuclear la tecnología evoluciona y avanza constantemente, lo que ha llevado la evolución y desarrollo de las normas de seguridad basadas en los nuevos conocimientos y la experiencia adquirida. Como resultado, la industria nuclear se destaca como uno de los sectores industriales más tecnológicamente avanzados.

Los reactores nucleares se clasifican en diferentes generaciones según la evolución tecnológica incorporada en sus diseños. La mayoría de los reactores nucleares en funcionamiento pertenecen a la generación II. Actualmente se están construyendo reactores de la generación III/III+ y se está trabajando en el desarrollo e implementación de la generación IV.

El objetivo fundamental de mejorar los diseños y avanzar en las generaciones es conseguir la máxima seguridad, minimizando los riesgos asociados a la interacción humana, ya sea por error o crimen, de manera que no puedan provocar un accidente grave.

Las generaciones de los reactores son las siguientes (Martínez Moreno, 2017):

- Reactores de Generación I: prototipos iniciales construidos antes de 1965, marcaron el comienzo de la industria nuclear.
- Reactores de Generación II: centrales nucleares construidas en las décadas de los años 70, 80 y 90.
- Reactores de Generación III y III+: incorporan mejoras evolutivas con respecto a la generación anterior basadas en la experiencia adquirida.
- Reactores de Generación IV: reactores cuya tecnología es innovadora, se encuentra en fase de investigación y desarrollo. Se espera que puedan estar en operación comercial en los próximos 15 años. Su objetivo es suplir las carencias de la generación anterior.

Cada generación de reactores nucleares tiene como finalidad abordar las deficiencias de la generación anterior y mejorar en áreas clave, impulsando así el avance continuo de la industria nuclear hacia una mayor seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

El reactor es el componente más importante de la central nuclear, existen distintos tipos de reactores nucleares, los diseños más habituales en el mundo son:

- El reactor de agua a presión (PWR)
- El reactor de agua en ebullición (BWR)

Estos dos diseños constituyen el 85% de los reactores en operación, gran porcentaje de los reactores que se están construyendo alrededor del mundo son del tipo PWR (World Nuclear Association, 2023). Pero también existen otros tipos de reactores en fase de operación y a continuación expondré el funcionamiento básico de los tipos con mayor número de reactores en operación (World Nuclear Association, 2023).

Expondré el funcionamiento de un reactor de agua a presión con más detalle por ser el tipo de reactor más abundante. El funcionamiento del resto de tipos de reactores es análogo a este, existen algunos detalles específicos que mencionaré a continuación.

## 2.4.a Reactor de agua a presión (PWR)

Los reactores de agua a presión (PWR) son los reactores nucleares más comunes en el mundo. Actualmente, aproximadamente 307 reactores PWR están en funcionamiento, lo que representa alrededor del 70% del total. En España, seis de los siete reactores en funcionamiento son del tipo PWR (World Nuclear Association, 2023).

En este tipo de reactor, se utiliza combustible en forma de pellets cerámicos de uranio enriquecido, generalmente con un porcentaje de enriquecimiento del 3,5% al 5%. El núcleo del reactor puede contener entre 80 y 100 toneladas de uranio (Energy Encyclopedia, 2023).

Una central nuclear con un reactor PWR está compuesta por tres circuitos hidráulicos principales. El primero de ellos es un circuito cerrado y radioactivo, cuya función es extraer la energía calorífica del reactor. El circuito secundario también es cerrado y se encarga de refrigerar al primario transformándose a su vez en vapor de agua, el cual mueve la turbina. Por último, el circuito terciario es abierto y refrigerar al secundario.

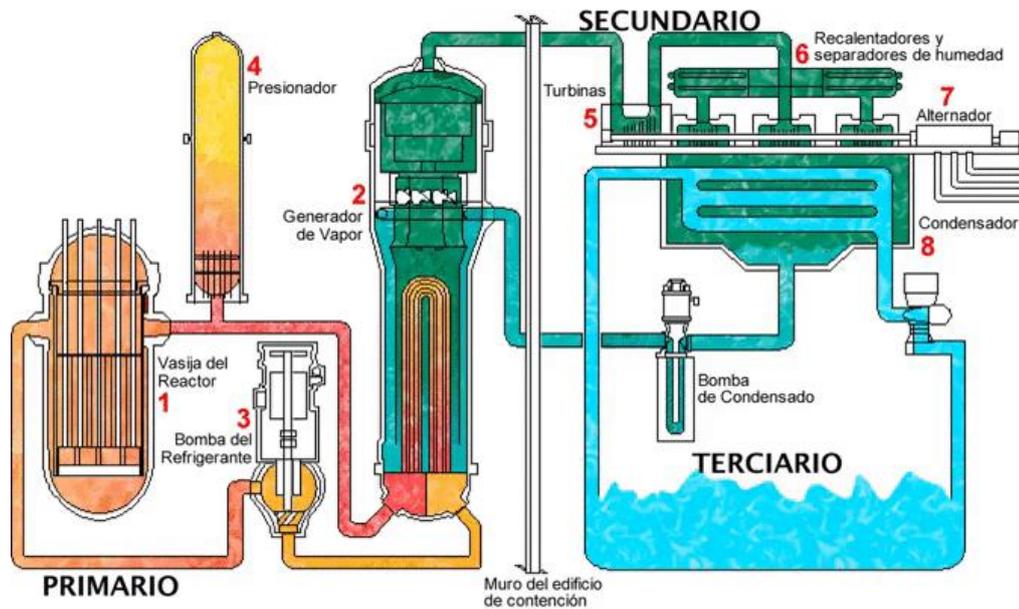


Figura 6. Esquema básico del funcionamiento de una central con una PWR (García Fernández, 2022)

En la Figura 6 se expone el esquema básico de una central nuclear con un reactor del tipo PWR con sus tres circuitos hidráulicos principales. El agua del circuito primario cumple la función de refrigerante y moderador.

El circuito primario consta de los siguientes elementos, la vasija, los generadores de vapor, el presionador y las bombas que impulsan el refrigerante hacia el núcleo del reactor. Lo habitual es disponer de varios lazos iguales, con una vasija y varios generadores. El circuito secundario está formado por el generador, la turbina, los recalentadores, el alternador y el condensador (García Fernández, 2022).

En el diseño de reactor PWR, el agua desmineralizada del circuito primario circula en estado líquido con una temperatura y presión elevadas, la presión elevada consigue que el agua se encuentre en estado líquido sobrecalentado. El agua sobrecalentada se encuentra en estado líquido entre los 100 °C (punto de ebullición) y 374 °C (temperatura crítica), si se pierde la elevada presión el agua empezaría a hervir formando burbujas de vapor las cuales son muy perjudiciales en este tipo de reactor. Para controlar la reacción en el agua del circuito primario, se utiliza una concentración de ácido bórico que puede ajustarse para reducir la potencia y detener el reactor.

Por medio de bombas esta agua es impulsada a través del núcleo del reactor, donde se calienta gracias al calor liberado por las reacciones de fisión. El agua del circuito primario entra al reactor con una temperatura de 292 °C y se calienta hasta alcanzar los 326 °C, con una presión de 15,7 megapascales (MPa) (García Fernández, 2022).

Después de pasar por el reactor, el agua del circuito primario fluye hacia el generador de vapor. En el generador de vapor los tubos del circuito primario y secundario intercambian calor. El agua a alta temperatura del circuito primario se enfría y cede calor al secundario, que se calienta y se convierte en vapor. Tras enfriarse hasta los 292 °C el agua del circuito primario es impulsada nuevamente por las bombas hacia el reactor.

Para reducir las irreversibilidades por el intercambio de calor, el circuito secundario también se encuentra a una temperatura y presión elevadas. La presión en el circuito secundario es menor que en el circuito primario, lo que permite obtener el vapor de agua necesario para impulsar la turbina.

El agua del circuito secundario al calentarse supera su temperatura de saturación y se transforma en vapor de agua, este vapor del circuito secundario se dirige hacia la turbina, donde se expande haciendo girar sus álabes.

El movimiento de la turbina se transmite al generador eléctrico, transformando la energía mecánica en energía eléctrica para su posterior distribución por la red eléctrica.

Dado que el vapor proveniente de la turbina aún tiene una temperatura elevada, es necesario condensarlo para continuar con el ciclo de vapor-agua como en una central térmica convencional. Para enfriar el circuito secundario se emplea el circuito terciario. Este circuito de refrigeración utiliza un gran caudal de agua fría procedente de un río, lago o mar. Esta agua fría circula a través de los tubos del circuito de refrigeración y se dirige hacia el condensador, donde se produce el intercambio de calor entre los circuitos. El agua caliente del circuito terciario debe enfriarse antes de ser devuelta a su fuente de origen. El circuito terciario se dirige hacia el sumidero de calor que puede ser una la torre de refrigeración, río o pantano, donde el agua se enfría. El funcionamiento de una torre de refrigeración se describe con más detalle en el capítulo 4.5.

El agua líquida del circuito secundario que sale del condensador es impulsada para ser precalentada antes de volver al generador de vapor para repetir el ciclo. El precalentamiento se realiza para reducir irreversibilidades energéticas.

La presión en el condensador es menor que la presión de los tubos del circuito de refrigeración del circuito terciario que lo atraviesan. Esto garantiza que, en caso de producirse una fisura en los tubos, el agua del circuito terciario se filtraría hacia el condensador y no al revés, evitando así posibles escapes al medio ambiente (García Fernández, 2022).

En estos reactores, las barras de control se encuentran situados en la parte superior de la vasija del reactor. Cuando es necesario detener o reducir la potencia del reactor, estas barras se insertan en la vasija mediante la acción de la gravedad al liberarse los mecanismos de sujeción electromagnéticos.

En la Figura 7 se observa el esquema básico del reactor PWR con más detalle.

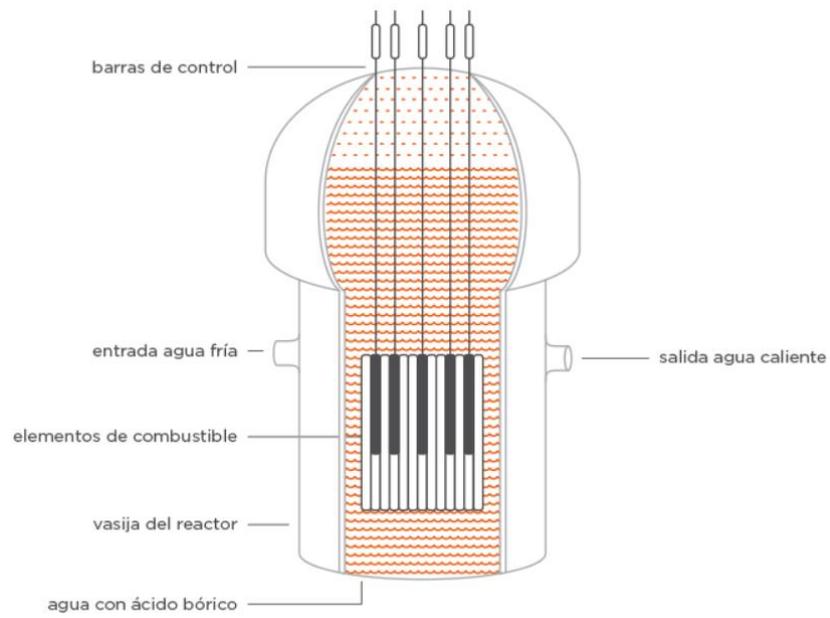


Figura 7. Esquema de un reactor PWR (Asociación Nuclear Ascó Vandellós II A.I.E., 2023)

## 2.4.b El reactor de agua en ebullición (BWR)

Los reactores de agua en ebullición (BWR) son el segundo tipo de reactor más comunes. Existen aproximadamente 60 BWR en funcionamiento en todo el mundo, lo que representa cerca del 14% del total (World Nuclear Association, 2023). En España solo hay un reactor de este tipo en funcionamiento, ubicado en la central nuclear de Cofrentes en Valencia, la cual se muestra en la Figura 8.

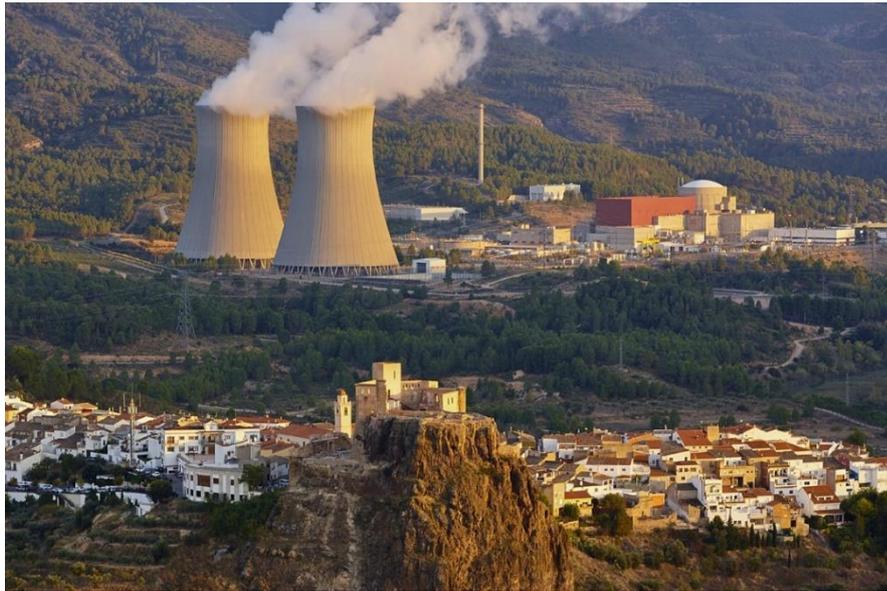


Figura 8. Central Nuclear de Cofrentes en Valencia (Energy Encyclopedia, 2023)

En los reactores BWR, se utiliza combustible en forma de pellets cerámicos de uranio enriquecido, generalmente con un porcentaje de enriquecimiento del 2,1% al 2,6% (Energy Encyclopedia, 2023). El agua se utiliza tanto como moderador y refrigerante. A diferencia de los reactores PWR, no existe un circuito secundario separado de agua-vapor, es el mismo agua refrigerante que circula por la vasija y el núcleo del reactor el que se evapora al pasar por el núcleo.

La ebullición del agua también se utiliza con el propósito de controlar las reacciones de fisión, las burbujas de vapor ralentizan la reacción de fisión. La presión del agua es de 7 MPa y su temperatura es de aproximadamente 280 °C. El vapor generado dentro del reactor se suministra directamente a una turbina para generar electricidad (Energy Encyclopedia, 2023).

La vasija del reactor dispone de unos lazos de recirculación exteriores que permiten la regulación rápida del caudal del refrigerante y, por tanto, el control de la potencia del reactor.

En este tipo de reactores, las barras de control están situadas en la parte inferior de la vasija y son insertadas mediante un sistema hidráulico que utiliza el propio refrigerante a alta presión como fluido.

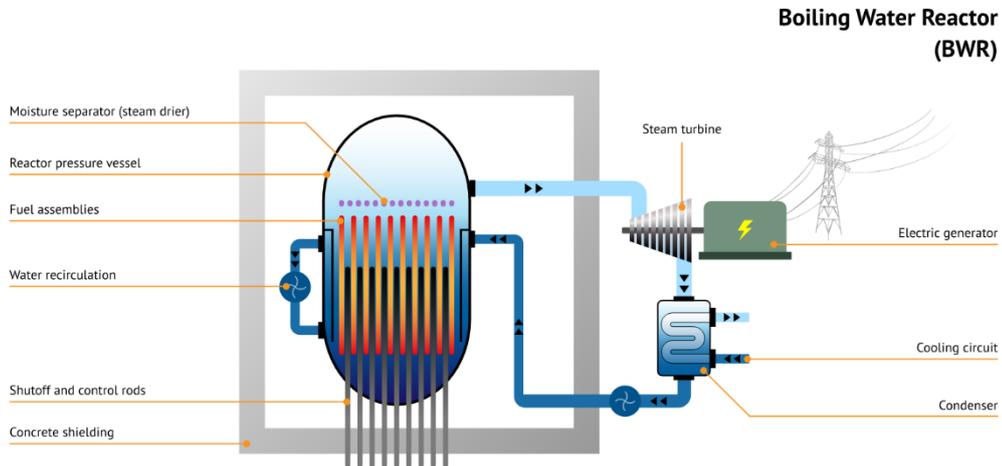


Figura 9. Esquema básico de una central nuclear con un reactor BWR (Energy Encyclopedia, 2023)

En la Figura 9 se muestra el esquema básico de una central nuclear con un reactor BWR.

## 2.4.c Reactor de agua pesada a presión (PHWR)

En el mundo existen unos 47 reactores de agua pesada a presión (PHWR), representan al 10% de los reactores en operación, de los cuales 35 pertenecen al tipo CANDU (Canada Deuterium Uranium), los cuales fueron desarrollados en Canadá (World Nuclear Association, 2023).

Estos reactores se caracterizan por utilizar uranio natural no enriquecido como combustible. El núcleo del reactor consiste en un recipiente cilíndrico de gran tamaño colocado en posición horizontal, que cuenta con canales para alojar el combustible.

El agua pesada ( $D_2O$ ) a alta presión se utiliza tanto como refrigerante y moderador. El agua pesada presenta propiedades superiores como moderador en comparación con el agua ordinaria y su capacidad de absorber neutrones es reducida permitiendo el uso de uranio natural no enriquecido como combustible. En el circuito primario, el agua pesada opera a una presión de 9,3 MPa y a una temperatura de 300 °C. Es importante enfriar el agua pesada, ya que a medida que aumenta la temperatura, sus propiedades como moderador empeoran (World Nuclear Association, 2023).

El agua pesada transfiere su energía al circuito secundario en el generador de vapor, por el que circula agua común, este vapor es el que impulsa la turbina.

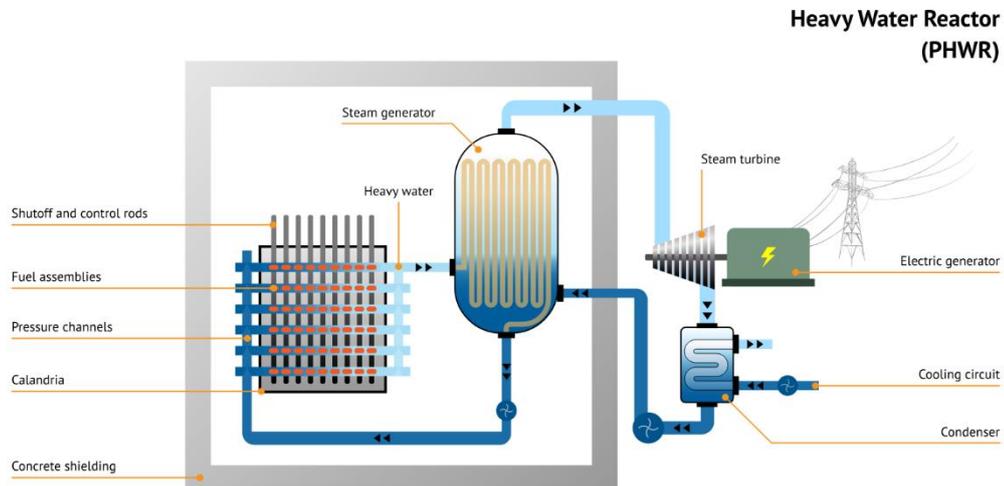


Figura 10. Esquema básico de una central nuclear con un reactor PHWR (Energy Encyclopedia, 2023)

Un aspecto destacado de los reactores CANDU es su capacidad de ser recargados mientras están en funcionamiento. La Figura 10 muestra el esquema básico de una central nuclear con un reactor PHWR.

## 2.4.d Reactor refrigerado por gas avanzado (AGR)

Se trata de la segunda generación de reactores británicos refrigerados por gas, en el mundo existe un total de 8 reactores operativos de tipo avanzado (AGR) (World Nuclear Association, 2023).

El núcleo del reactor es un recipiente esférico de acero de 8 metros de altura y 14 metros de diámetro, el cual está encapsulado en hormigón para su contención.

El moderador utilizado en este tipo de reactor es el grafito. El dióxido de carbono se utiliza como refrigerante presurizado a 2,75 MPa a una temperatura de hasta 650 °C. El gas transfiere su energía en un generador de vapor al circuito secundario de agua. El vapor generado alimenta una turbina.

En la Figura 11 se muestra el esquema de una central nuclear con un reactor GCR, estos reactores fueron desarrollados en Gran Bretaña.

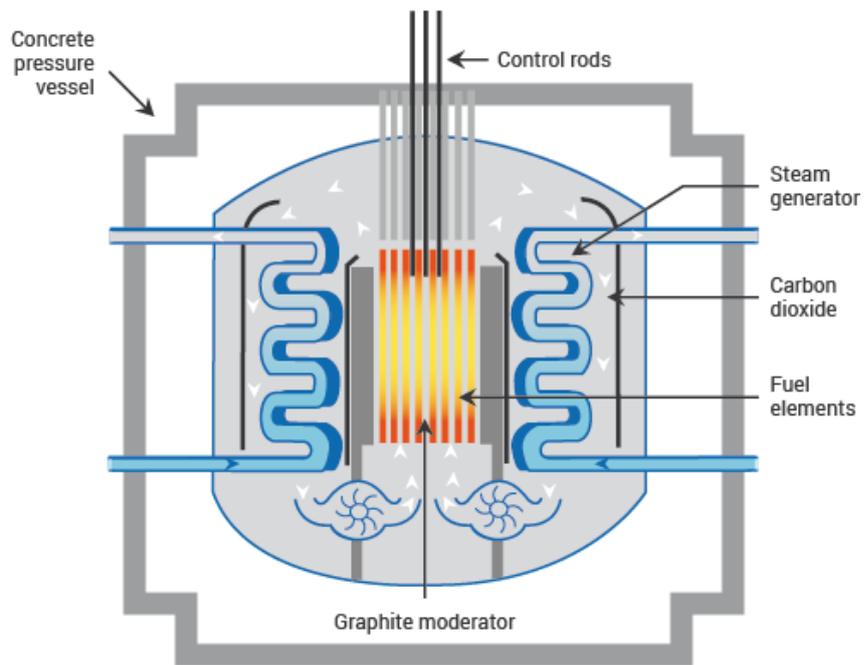


Figura 11. Reactor refrigerado por gas avanzado (World Nuclear Association, 2023)

## 2.5. El futuro de la fisión nuclear.

### Los reactores de cuarta generación

*The Generation IV International Forum* (GIF) fue creada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos en el año 2000 y establecido formalmente en el año 2001. Este acuerdo internacional representa a los gobiernos de 14 países en los que se considera crucial a la energía nuclear para el desarrollo futuro. El objetivo de los países miembros del GIF es el desarrollo de la próxima generación de reactores nucleares de forma conjunta. Los países fundadores de GIF son Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea del Sur, Sudáfrica, Reino Unido y Estados Unidos. Posteriormente también se unieron Suiza, China, Rusia, Australia y la Unión Europea a través del programa de investigación *Euratom*. La mayoría de los países forman parte del Acuerdo Marco de 2005, que establece su compromiso de participar en el desarrollo de uno o más sistemas de la Generación IV seleccionados por el GIF para continuar con la investigación y el desarrollo. Argentina, Australia, Brasil y Reino Unido no forman parte del Acuerdo Marco por ello son miembros inactivos del GIF.

El propósito de GIF es invertir en I+D mediante la cooperación internacional para desarrollar la tecnología de la Generación IV de reactores nucleares. Después de aproximadamente dos años de deliberación y revisión de numerosos diseños, en el año 2002, cuando el GIF estaba compuesto por 10 países, un comité de expertos anunció la selección de seis diseños de reactores innovadores que, según sus criterios, representaban el futuro de la energía nuclear ( Generation IV International Forum, 2021).

Estos diseños fueron seleccionados teniendo en cuenta los siguientes principios:

- **Sostenibilidad:** estos reactores deben promover la utilización eficiente del combustible, minimizar el volumen y el tiempo de gestión de los residuos radiactivos.
- **Economía:** deben ofrecer ventajas económicas frente a otras tecnologías energéticas durante su ciclo de vida operativo y equiparar su nivel de riesgo financiero con otros proyectos energéticos.
- **Seguridad y confiabilidad:** los diseños deben minimizar la probabilidad y magnitud de daños en el núcleo del reactor y eliminar la necesidad de tomar medidas de emergencia fuera del emplazamiento.
- **No proliferación y protección física:** deben representar la opción menos deseable y atractiva para la utilización de materiales con fines no pacíficos de la energía nuclear.

Estos nuevos modelos han sido desarrollados para superar las limitaciones de las generaciones anteriores. Algunas de las ventajas de los reactores incluyen:

- La modularidad, los componentes del sistema pueden ser fabricados en módulos en fábricas y ser trasladados al emplazamiento de la instalación, reduciendo los tiempos de construcción.
- Reducción del capital en la inversión inicial, siendo más atractivos desde el punto de vista financiero.
- Reducción de los costes de construcción, la modularidad y otras mejoras en el diseño contribuyen a la reducción de los costos de construcción de estas instalaciones.
- Flexibilidad en la elección del emplazamiento, facilitando su integración en diferentes ubicaciones geográficas
- Mayor eficiencia al poder integrarse con otras fuentes de energía, incluyendo energías renovables y térmicas fósiles.

Durante más de dos década, GIF ha liderado los esfuerzos de colaboración internacional para desarrollar los sistemas de energía nuclear de la próxima generación que puedan ayudar a satisfacer las futuras necesidades energéticas del mundo. Los diseños de la Generación IV utilizan el combustible de manera más eficiente, reducirán la producción de residuos radiactivos, serán competitivos económicamente y cumplirán con estrictos estándares de seguridad y no proliferación nuclear. Estos reactores actualmente no se encuentran en fase comercial, algunas centrales nucleares ya han empezado a operar con estos reactores innovadores. La mayoría de los sistemas emplean un ciclo de combustible cerrado para maximizar los recursos y minimizar los residuos radiactivos. El ciclo del combustible se explica en el capítulo 4.2.

Los diseños de reactores que se están desarrollando son los siguientes:

- Reactor rápido refrigerado por gas (GFR).
- Reactor de muy alta temperatura (VHTR).
- Reactor supercrítico refrigerado por agua (SCWR).
- Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR).
- Reactor rápido refrigerado por aleación de plomo (LFR).
- Reactor de sales fundidas (MSR).

En la tabla 1 se muestran las características de los reactores pertenecientes a la cuarta generación.

Reactores IV Generación desarrollados por GIF							
	Espectro	Refrigerante	Temperatura (°C)	Presión	Combustible	Potencia MW	Aplicaciones
GFR	Rápido	Helio	850	Alta	U-238	1200	Electricidad Hidrógeno
LFR	Rápido	Plomo-Bismuto	480-570	Baja	U-238	300-1000	Electricidad Hidrógeno
MSR	Rápido	Sales fluoradas	750-1000	Baja	UF en sal	1000	Hidrógeno
SFR	Rápido	Sodio	500-550	Baja	U-238 y MOX	150-1500	Electricidad
SCWR	Térmico o rápido	Agua	520-625	Muy Alta	UO <sub>2</sub>	300-1500	Electricidad
VHTR	Térmico	Helio	900-1000	Alta	UO <sub>2</sub>	200-300	Electricidad Hidrógeno

Tabla 1. Reactores de cuarta generación

Muchos de estos reactores pueden emplearse para la generación de energía eléctrica y también para la producción de hidrógeno. Los reactores nucleares actuales también pueden producir hidrógeno si su energía eléctrica se destina hacia una planta de producción de hidrógeno.

La mayoría de estos seis reactores emplean un ciclo de combustible cerrado, lo que implica un reciclaje completo del combustible usado. Esto permite aprovechar prácticamente toda la energía contenida en el combustible, un 97% en comparación al 5% de la energía extraída del combustible actualmente. Además, el combustible usado almacenado podría ser utilizado como recurso energético, lo que brinda una solución potencial para el tratamiento de los residuos nucleares.

Estos reactores operan a temperaturas significativamente más altas, que oscilan entre los 500 y los 1000°C. Estas temperaturas superiores aumentan el rendimiento termodinámico permitiendo una mayor eficiencia en la producción de energía.

Cuatro de los diseños de reactores de cuarta generación trabajan con el espectro de neutrones rápidos, lo que significa que no requieren de un moderador para reducir la energía cinética de los neutrones y producir nuevas fisiones, como ocurre en los reactores actuales.

Un ejemplo de mejora en cuanto a seguridad es el reactor rápido refrigerado por aleación de plomo (LFR), que no necesita bombas alimentadas por electricidad, ya que el metal líquido del refrigerante fluye por convección natural, en caso de perder el suministro eléctrico el reactor podría refrigerarse sin ningún problema. En el reactor de sales fundidas (MSR) el uranio se encuentra disuelto en forma de sal en el refrigerante. Estos reactores presentan un menor riesgo de fusión debido a la menor cantidad de

combustible presente en comparación con los reactores actuales (García Fernández, 2020).

Estos avances tecnológicos buscan garantizar la seguridad tanto para los trabajadores de la industria nuclear como para la población, al tiempo que se busca aprovechar los beneficios de la energía nuclear en términos de producción de energía eléctrica de manera eficiente y sostenible.

Los reactores modulares pequeños (SMR) representan una perspectiva futura en la industria nuclear, aunque no son considerados oficialmente parte de la cuarta generación de reactores según el GIF. Esta no es una idea novedosa, ya en la década de 1950 se construyeron reactores pequeños para impulsar submarinos, portaaviones y rompehielos, permitiendo recorrer grandes distancias sin necesidad de recargar combustible.

A medida que las centrales nucleares han evolucionado, también han aumentado su tamaño para optimizar recursos y maximizar la producción de energía eléctrica. Los reactores nucleares actuales suponen unos costes elevados y posibles sobrecostes en los que se puede incurrir durante el proyecto. Los costes de una central nuclear se describen en el capítulo siguiente. Los reactores modulares pequeños ofrecen una solución a estos desafíos.

Existe diversos diseños de SMR, algunos son versiones en escala reducida de los reactores actuales, mientras que otros presentan diseños completamente innovadores.

Estos reactores pueden fabricarse en serie, lo que reduce los tiempos de construcción y los costes asociados. Además, su tamaño compacto facilita su transporte y al incorporar todos los sistemas necesarios para su funcionamiento autónomo podrían aprovecharse infraestructuras ya existentes para su ubicación.

Estos reactores modulares pequeños tienen el potencial de mitigar los riesgos financieros asociados con las centrales nucleares a gran escala, al competir de manera efectiva con otras fuentes de generación de energía. Su diseño modular permite la instalación de varios módulos en un mismo emplazamiento, los cuales pueden conectarse entre sí. Además, el desmantelamiento de estos reactores es más sencillo, ya que bastaría con extraer el módulo de la central.

## 2.6. El futuro de la energía nuclear.

### La fusión nuclear

La fusión nuclear es un proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros se unen para formar un núcleo más pesado. El sol y otras estrellas se alimentan de la fusión nuclear, este proceso desprende energía gracias a la diferencia de masa entre los núcleos, el núcleo pesado resultante es más ligero que la suma de los núcleos más ligeros, según la ecuación de Einstein  $E = mc^2$ .

El Sol es un enorme reactor nuclear de fusión, donde los átomos de hidrógeno se fusionan para formar helio, liberando cantidades significativas de energía en el proceso. A muy elevada presión y temperatura el hidrógeno cambia de estado, pasando de gas a plasma, donde los componentes cargados negativamente se separan de los núcleos quedando estos cargados positivamente. Aunque la fuerza electrostática de repulsión entre los protones tiende a mantener los núcleos separados, la presión y temperatura tan elevadas de las estrellas permiten que la velocidad de los núcleos aumente y se acerquen lo suficiente como para fusionar. Como resultado de esta fusión, se libera energía en forma de luz, calor y partículas. La capacidad de lograr la fusión nuclear controlada en la Tierra es un desafío técnico y científico complejo.

Varios países, entre ellos la Unión Europea, Estados Unidos, Rusia y Japón, están llevando a cabo investigaciones para desarrollar tecnologías que permitan la fusión controlada. Sin embargo, hasta el momento, los seres humanos solo han logrado realizar la fusión de forma descontrolada a través de la bomba de fusión termonuclear.

No todas las reacciones de fusión generan la misma cantidad de energía, la reacción más sencilla de conseguir con la tecnología actual es la fusión de deuterio y tritio para formar helio. Tanto el deuterio como el tritio son isótopos del hidrógeno, el elemento más abundante en el universo. El deuterio está formado por un protón y un neutrón, mientras que el tritio por un protón y dos neutrones. Esta reacción libera hasta cuatro veces más energía que la fisión nuclear. El deuterio se encuentra en el agua de los océanos y es muy relativamente abundante, en cambio el tritio es escaso, pero podría producirse a partir del litio, un elemento presente en grandes cantidades en la corteza terrestre.

El funcionamiento de un reactor de fusión sería semejante al de un reactor de fisión. Los neutrones generados de la fisión serían absorbidos por una gruesa capa de material que contiene litio y rodea al núcleo del reactor. Al interactuar con estos neutrones, el litio se convertiría en tritio y se utilizaría como

combustible para alimentar el reactor. Durante este proceso la capa de material se calentaría y transferiría energía térmica con el refrigerante, el cual haría funcionar una turbina al igual que los reactores actuales.

A pesar del potencial de la fusión nuclear como una fuente de energía limpia y abundante, su implementación controlada ha sido un desafío técnico y científico considerable. La creación de las condiciones necesarias para la fusión nuclear requiere temperaturas y presiones extremadamente altas además de mantener el plasma lo suficientemente estable y contenido durante el proceso es complicado.

Actualmente se están investigando dos enfoques principales para conseguir la fisión (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023):

- Fusión por confinamiento inercial. Consiste en calentar una pastilla de combustible mediante haces de láser, la capa exterior se calienta y explota, produciendo una gran compresión. La energía liberada calienta el combustible produciendo la fusión.
- Fusión por confinamiento magnético. El combustible se encuentra confinado en un campo magnético a baja presión y se calienta hasta la temperatura de fusión. El campo magnético mantiene el plasma atrapado en su interior sin entrar en contacto con las paredes del reactor, no hay ningún material que pueda soportar temperaturas tan elevadas. El reactor tiene forma toroidal para contener el campo magnético de forma eficiente, este reactor recibe el nombre de *tokamak* por sus siglas en ruso (cámara toroidal con bobinas magnéticas).

La fusión nuclear podría ser una fuente de energía prácticamente inagotable y muy barata. El agua de océanos contiene suficiente agua pesada para consumirla durante millones de años. Esta reacción al igual que la fisión no libera gases de efecto invernadero.

La fusión generaría mayor cantidad de energía por unidad de combustible sin producir prácticamente residuos. Será también una energía más segura ya que la reacción se detendrá una vez que se corte el suministro de combustible. Además, a diferencia de la fisión nuclear, la fusión nuclear no produce residuos radiactivos a largo plazo. Solo sería necesario almacenar los residuos durante 50 años y estos serían de baja actividad (García Fernández, 2020).

Actualmente, los científicos e ingenieros están trabajando en el desarrollo de reactores de fusión experimental, es más avanzado es el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) localizado en Francia, con el objetivo de lograr la fusión nuclear controlada y demostrar su viabilidad como fuente de energía.

En 1985, la Unión Soviética impulsó la participación de varios países en la construcción de un reactor tokamak experimental. Estos países fueron Estados

Unidos, varios países europeos y Japón. Esta colaboración se estableció bajo el amparo del OIEA, comenzando con el diseño de un reactor experimental para demostrar la viabilidad de esta tecnología. Durante años varios países más se han unido al proyecto, en 2005 se decidió construir este reactor en el sur de Francia y a comienzos del 2013 empezó su fabricación. Este reactor no generará electricidad, se espera que la central eléctrica de demostración llamada DEMO sea el paso intermedio entre el ITER y los primeros reactores de fusión comerciales. Este proyecto se ha ido retrasado y su fabricación está planeada para después del 2040 (World Nuclear Association, 2023).

Otros proyectos que investigan demostrar la viabilidad de los reactores de fisión son el JET, Tokamak Energy, KSTAR o EAST. El ITER es el más avanzado por los años que llevan investigando y desarrollando el reactor experimental.

La energía de fisión podría convertirse en una herramienta esencial compatible con el desarrollo y con la mitigación del calentamiento global, asegurando un suministro constante de energía eléctrica con unas emisiones bajas en carbono y unos residuos radiactivos de actividad media, con un impacto menor en el medio ambiente. Pero esta tecnología se encuentra en desarrollo y todavía debe enfrentarse a muchos desafíos y no es una tecnología viable actualmente.

## 2.7. Tabla resumen reactores nucleares

		Tipo de reactor	En operación comercial	Viabilidad tecnológica	Ciclo termodinámico	Viabilidad económica	Impacto medioambiental	Diseños mejorados
Fisión nuclear	Generación II	PWR	307	En operación comercial	Ciclo Rankine	Viable	Residuos de alta actividad	AP-600 (Gen III) AP-1000 (Gen III+)
		BWR	60	En operación comercial	Ciclo Rankine	Viable	Residuos de alta actividad	ABWR (Gen III) ESBWR (Gen III+)
		PHWR	47	En operación comercial	Ciclo Rankine	Viable	Residuos de alta actividad	
		LWGR	11	En operación comercial	Ciclo Rankine	Viable	Residuos de alta actividad	
		AGR	8	En operación comercial	Ciclo Rankine	Viable	Residuos de alta actividad	
		FNR	2	En operación comercial	Ciclo Rankine	Viable	Residuos de alta actividad	
	Generación IV	GFR	Viabilidad y ejecución	desarrollo	Ciclo Brayton	Inversión media	Productos de fisión de vida corta	
		LFR	Viabilidad y ejecución	desarrollo	Ciclo Brayton	Inversión media	Productos de fisión de vida corta	
		MSR	Viabilidad y ejecución	viable	Ciclo Brayton	Inversión baja	Productos de fisión de vida corta	
		SFR	Viabilidad y ejecución	viable	Ciclo Brayton	Inversión media	Productos de fisión de vida corta	
		SCWR	Viabilidad y ejecución	desarrollo	Ciclo Brayton	Inversión elevada	Productos de fisión de vida corta	
		VHTR	Viabilidad y ejecución	viable	Ciclo Brayton	Inversión elevada	Productos de fisión de vida corta	
Fusión nuclear	tokamak	Viabilidad y ejecución	desarrollo		Inversión elevada	Muy pocos y con una vida corta		

Tabla 2. Resumen reactores nucleares

La tabla 2 presenta un resumen de los reactores tanto en operación como en desarrollo, clasificados en tecnología de fisión y tecnología de fusión.

Uno de los reactores más viables de la cuarta generación es el reactor rápido refrigerado por sodio (SFR), el tipo de reactor rápido más investigado. Varios países como Rusia, Estado Unido China operan reactores experimentales de este tipo (Locatelli, Mancini, M, & Todeschini, 2013).

Los reactores de IV Generación se encuentran en etapas de viabilidad y ejecución, con el objetivo de demostrar su funcionamiento y seguridad a través de la construcción de prototipos a pequeña escala. Los diseños más avanzados son los reactores rápido refrigerado por sodio (SFR), reactores de muy alta temperatura (VHTR) y reactores rápido refrigerado por aleación de plomo (LFR).

Una vez demostrada su capacidad, se espera que los reactores de IV Generación puedan ser implementados a escala comercial.

En la viabilidad económica una inversión baja significa que sus costes son muy semejantes a los reactores en fase comercial.

En la tabla también aparecen reactores de segunda generación que no he mencionado debido a al número tan bajo de reactores en operación, estos son los reactores de agua ligera refrigerados por grafito (LWGR), el reactor de neutrones rápidos (FNR) y el reactor de alta temperatura refrigerado por gas (HTGR).



# Capítulo 3. Análisis económico

Para analizar los costes de la energía nuclear se mostrará su LCOE (Levelized Cost of Electricity) o Coste Nivelado de Electricidad, esta es una métrica empleada para evaluar el coste de la generación de energía eléctrica a lo largo de la vida útil de una planta de generación.

El LCOE se calcula considerando el coste total de construcción y operación de la central durante su vida útil, dividido por la producción total de electricidad generada en ese período. De esta manera, se obtiene el coste por unidad de energía generada, lo que permite comparar los costes de diferentes tecnologías energéticas y evaluar su viabilidad económica.

Para estimar de manera aproximada el coste de la energía nuclear es necesario analizar los costes de inversión, los costes de operación y mantenimiento, los costes de combustible además de los costes de los tratamientos de residuos y desmantelamiento que suelen estar incluidos en los costes de operación.

Es importante destacar que los costes de la energía nuclear pueden variar significativamente dependiendo del país, el diseño de la planta, las políticas regulatorias y otros factores. Por tanto, los análisis detallados y las estimaciones específicas deben ser realizados para cada proyecto.

## 3.1. Inversión inicial

La construcción de una central nuclear implica una inversión inicial muy elevada. Los datos de la inversión inicial de una central nuclear que se muestran a continuación son overnight cost, excluyendo los gastos de financiación devengados durante el periodo de construcción. La construcción de una central nuclear es un gran proyecto de infraestructura con un componente tecnológico muy importante.

Según la Sociedad Nuclear Española, el precio estimado de construir una central nuclear con un reactor avanzado varía entre 4.000 y 5.000 millones de euros por cada gigavatio de potencia instalada, dado su alto coste se requiere una amortización a largo plazo, aproximadamente 30 años (Sociedad Nuclear Española, 2023). Según las declaraciones de Alfredo García Fernández en diferentes entrevistas, quien posee las licencias de operador y supervisor en la central nuclear de Ascó, son necesarios unos 60 años para poder amortizar las centrales nucleares de nueva construcción. El informe *Nuclear Power Economics and Project Structuring* de la Asociación Nuclear Mundial también refleja que las centrales nucleares de nueva construcción operarán durante unos 60 años, este período refleja el tiempo necesario para amortizar la inversión y corresponde al tiempo de diseño de la planta (World Nuclear Association, 2017).

Las estimaciones de los costes de las centrales nucleares actualmente están sujetas a una gran incertidumbre, el Organismo de Energía Nuclear de la OCDE proyecta el coste de capital entre los 2 y los 7 millones de dólares el MW de potencia instalado. (Shirvan, 2022)

Estimar los costes relativos a las nuevas centrales nucleares que utilizan distintas tecnologías es complejo, actualmente se están construyendo y poniendo en marcha reactores de tercera generación. Estos son conocidos como reactores FOAK (First Of A Kind) debido a que son los primeros de su tipo.

También se están construyendo y poniendo en marcha reactores de cuarta generación, pero estos todavía no se encuentran en fase comercial sino en fase de investigación y desarrollo.

La construcción de estos reactores modernos es cara en comparación a los costes de los reactores de segunda generación construidos principalmente en la década de 1980. Para reducir los costes, se requiere la construcción de más centrales nucleares, lo que permite el aprendizaje y la experiencia acumulada en proyectos anteriores. Sin embargo, la construcción de estos reactores pioneros puede presentar desafíos y retrasos debido a la falta de experiencia encareciendo y retrasando el proceso de construcción.

Los costes de capital de una central nuclear incluyen el coste de preparación del emplazamiento, ingeniería, construcción, mano de obra, fabricación y puesta en marcha de una central nuclear. La construcción de un reactor nuclear requiere recursos humanos y materiales significativos, ya que es el componente principal y tecnológicamente más avanzado de la central. La inversión inicial es alta debido a la complejidad técnica y los estrictos requisitos de autorización y diseño necesarios para garantizar la seguridad de la instalación. Las tasas de los permisos suelen rondar los 60 millones de dólares por reactor y los costes de concesión de licencias son de unos 180-240 millones de dólares (World Nuclear Association, 2022).

En la Figura 12 se observa el precio de las primeras centrales nucleares con los primeros reactores de su tipo, a medida que se adquiere experiencia y se construyen más centrales nucleares el precio tiende a disminuir.

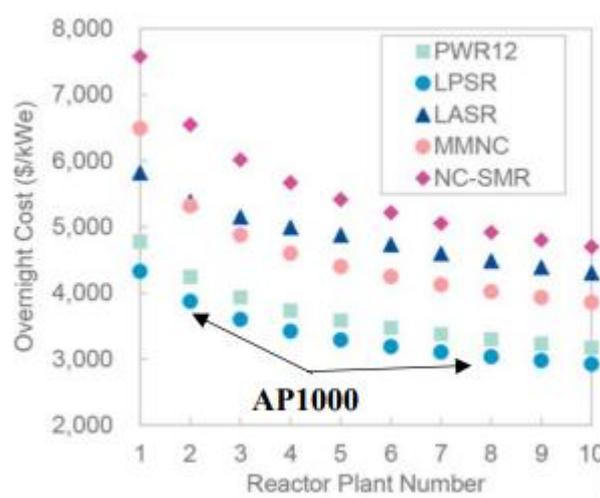


Figura 12. Coste de una central nuclear en función de los reactores operativos del mismo tipo (Shirvan, 2022)

Los reactores AP1000 pertenecen a la generación III+, este reactor pertenece a la Westinghouse Electric Company, es un reactor PWR, es una tecnología probada capaz de producir casi 10.000 GWh de energía sin emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera por año. Se estima que la vida útil de la planta puede extenderse fácilmente a los 80 años e incluso más. En China el precio de una central nuclear con un reactor AP1000 se encuentra aproximadamente en los 2.000 millones por gigavatio de potencia. En cambio, en Estados Unidos es de 4.300 millones de dólares el gigavatio, se espera que el precio de los futuros reactores se reduzca hasta los 2.900 millones de dólares. El coste también podría aumentar hasta en 1,2 veces debido a la inflación Post-COVID y el aumento en el coste de materiales, (Shirvan, 2022).

Según el informe *Nuclear Power Economics and Project Structuring* el 60% del LCOE de la energía nuclear está influenciado por su inversión inicial de capital. Como ya he mencionado en el capítulo anterior, China es uno de los países que más está invirtiendo en energía nuclear, sus primeros reactores también eran más caros, sin embargo, ahora están construyendo en plazo y ajustándose al presupuesto previsto inicialmente. El LCOE de la energía nuclear en China tiene un coste más bajo que el resto de las tecnologías energéticas a excepción de la hidroeléctrica (World Nuclear Association, 2017).

Para poder poner estas cantidades en contexto voy a mostrar la inversión inicial de distintas tecnologías de generación eléctrica, los costes de capital se expresan en función de la capacidad de generación, en euros/gigavatio de potencia instalada.

El coste de una planta fotovoltaica de 1 MW de potencia instalada es superior a un millón de euros, aproximadamente 1.300.000 de euros, este valor puede variar por diversos factores como el precio del terreno o el tipo de panel fotovoltaico (Balsera Yáñez, 2022). Con estos datos podemos estimar que una instalación de un gigavatio tiene un coste que rondaría los 1.300 millones de euros.

Iberdrola ha invertido en una planta fotovoltaica en Castilla La Mancha de 50 MW de potencia unos 150 millones (Iberdrola, 2021). El megavatio tiene un precio de 3 millones, para poder construir una planta fotovoltaica de un gigavatio de potencia sería necesaria una inversión inicial de 3.000 millones de euros aproximadamente.

Iberdrola ha invertido 120.000 millones de euros en los últimos veinte años convirtiéndose es el líder en energía renovable con más de 35.000 MW de potencia instalada (Iberdrola, 2021). El gigavatio procedente de fuentes de energía renovables en el caso de Iberdrola ha tenido un coste de 3.429 millones aproximadamente.

El precio de una parque eólico de un gigavatio de potencia instalada rondaría los 2.200 millones de dólares, este precio puede varias en función del modelo del aerogenerador y el emplazamiento (García de Soria, Villasante, Cabrera, & Melognio, 2008).

Una central térmica de ciclo combinado tiene un coste de unos 600.000 euros el megavatio (Centrales térmicas de ciclo combinado, 2023). El precio de construir una central térmica de ciclo combinado de un gigavatio de potencia instalada asciende a unos 600 millones de euros.

El precio de las diferentes tecnologías energéticas puede varias en función de la ubicación, el alcance del proyecto, las especificaciones técnicas entre otros.

Otro aspecto muy importante para tener en cuenta es la superficie de terreno que ocupan las distintas tecnologías energéticas, nos centraremos en las que no emiten gases de efecto invernadero en su ciclo de operación. El terreno es un bien cada vez más escaso y con un valor elevado en el mercado. Para una central tipo de 1 GW de potencia instalada la ocupación de terreno es la siguiente (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023):

- Nuclear entre 1 y 4 km<sup>2</sup>
- Solar entre 20 y 50 km<sup>2</sup>
- Eólica entre 50 y 150 km<sup>2</sup>

También es importante tener en cuenta la vida útil de la instalación, las placas fotovoltaicas tienen una vida útil de unos 30 años y los aerogeneradores de unos 25 años. Las placas fotovoltaicas sufren a lo largo de su vida útil un proceso de degradación y su potencia útil disminuye.

Las centrales nucleares de segunda generación tienen una vida de diseño de 40 años, pero su vida útil depende de su funcionamiento, seguridad y eficiencia, si cumple con las condiciones necesarias esta se puede extender a los 60 u 80 años.

El promotor de una nueva central nuclear se enfrenta a una incertidumbre considerable debido a un mayor riesgo de la inversión inicial. El tiempo de construcción de una central nuclear oscila entre cinco y diez años, este depende de los trámites burocráticos y de la experiencia de cada país en edificación de centrales nucleares de ese tipo. Todas las centrales nucleares construidas antes del 2024 estarán reconocidas por la Comisión Europea como “verdes”. La construcción de una central nuclear necesita estabilidad jurídica de forma que no se puedan retirar los permisos de explotación por razones no técnicas.

Cada país cuenta con su propia normativa referente al proceso de construcción de una central nuclear. En España este procedimiento está contemplado en el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR), aprobado mediante el Real Decreto 1836/1999. En este reglamento se recogen las autorizaciones necesarias para poder construir y poner en marcha una central nuclear (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023).

La inversión inicial de las centrales nucleares ha ido variando a lo largo del tiempo debido a los avances tecnológicos y en seguridad, con algunos precios muy elevados debido a los FOAK, en el 2002 la inversión para una unidad de un gigavatio de potencia instalada suponía un coste de 2.000 millones de dólares (Massachusetts Institute of Technology, 2009).

En el año 2003 una central nuclear con un reactor de diseño European Pressurized Reactor suponía una inversión de 3.000 millones de euros para las primeras unidades reduciéndose el precio en las siguientes. Este diseño de

reactor posee unas características de seguridad muy superiores a los exigibles en aquel momento de su construcción por los organismos reguladores (Almoguera, 2006).

Después de analizar estos datos podemos afirmar que es necesario construir más centrales nucleares con reactores para adquirir experiencia operativa y reducir los costes de los reactores nucleares.

A continuación, expondré la evolución de los precios de los reactores en Francia entre 1956 y 1991.

En Francia el coste de sus 56 reactores en operación ronda una inversión de 96.000 millones, estos reactores ofrecen una potencia neta de 63,130 GW (Pérez, 2018). El precio medio del GW francés es de 1.520 millones aproximadamente.

Hay que señalar que una central nuclear puede albergar varios reactores evitando así el precio de una construcción totalmente nueva de una central nuclear.

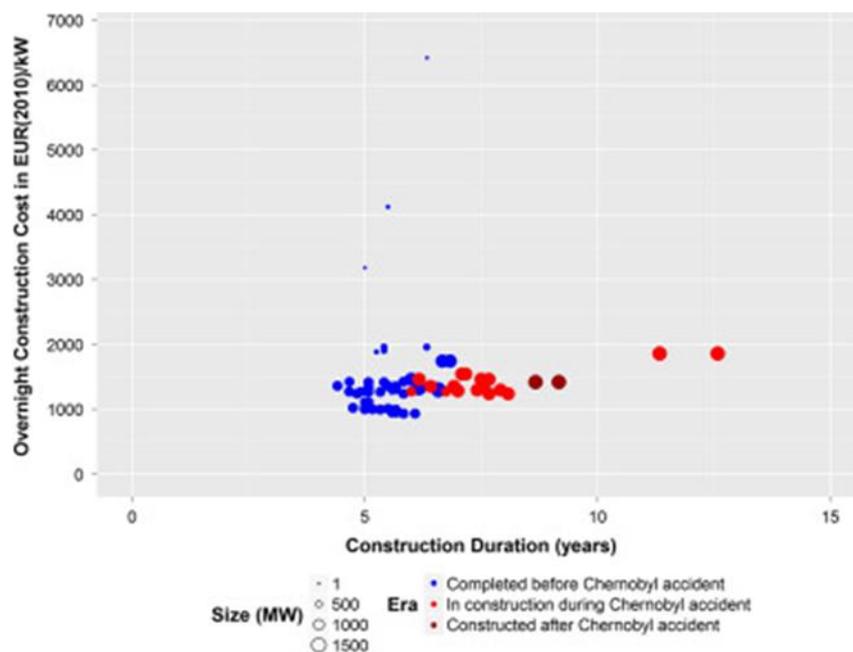


Figura 13. Tiempo de construcción de las centrales nucleares en Francia entre 1956 y 1991 (Loving J. R., Yip A., & Nordhaus A., 2016)

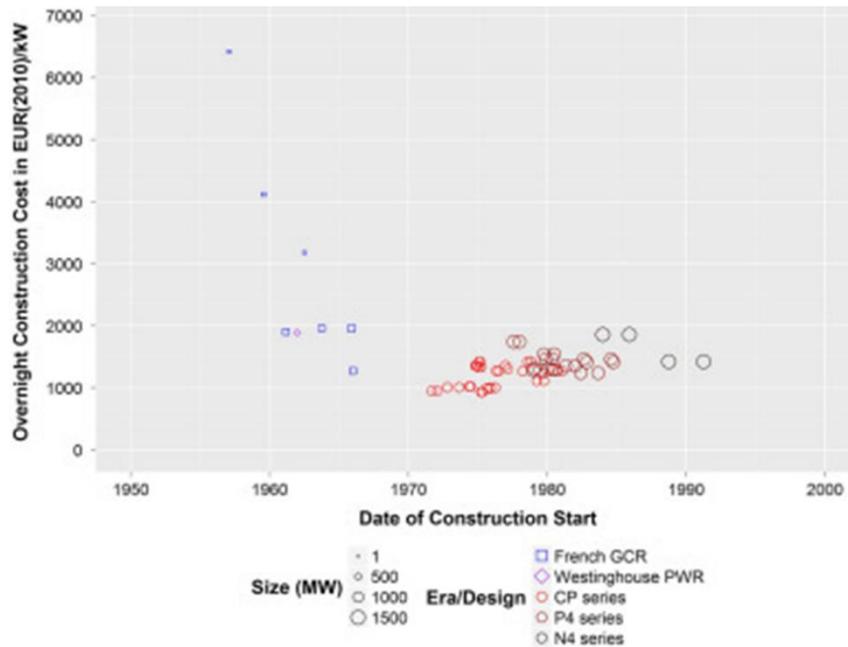


Figura 14. Evolución del precio de los reactores franceses entre 1956 y 1991 (Lovering J. R., Yip A., & Nordhaus A., 2016)

En la Figura 14 se observan los precios de los reactores francesas entre el año 1956 y 1991 y en la Figura 13 el tiempo de construcción.

Costes Francia	
Año	euros/GW
1957	6.500 millones
1962	2.000 millones
1966	1.200 millones
1971	1.000 millones
1991	2.000 millones

Tabla 3. Evolución precios de los reactores según el gigavatio en Francia.

En la tabla 3 se puede observar la variación de los precios en función del gigavatio de los reactores franceses. Los primeros reactores eran caros, debido a que los FOAK y observamos como con el paso del tiempo y de realizar más construcciones se adquiere experiencia y se reducen los precios.

Entre el año 1970 y el 1991 el precio de un reactor de un gigavatio oscila entre los 1.000 y los 2.000 millones.

El accidente de Chernóbil de 1986 produjo un ligero aumento en los costes y un aumento en la duración de la construcción de las centrales nucleares posteriores a este acontecimiento (Lovering J. R., Yip A., & Nordhaus A., 2016).

## 3.2. Gastos de explotación

Las centrales nucleares suponen una inversión de capital elevada, son costosas de construir, pero relativamente baratas de explotar. La energía nuclear es competitiva en costes con otras formas de generación de electricidad.

Los gastos de explotación incluyen los gastos de combustible y de operación y mantenimiento (O&M). Los costes de eliminación de residuos y desmantelamiento están incluidos en los costes de O&M. A diferencia de las centrales térmicas convencionales, los costos de combustible de las centrales nucleares representan una proporción menor de los costos totales de generación

Las centrales nucleares destacan por ser muy competitivas por su elevada fiabilidad, producen grandes cantidades de electricidad y están acopladas a la red eléctrica durante el 90% de las horas del año.

Los costes de combustible son prácticamente los únicos costes variables de producción y son relativamente bajos sólo un 6% del coste del kWh generado, son estables y poco susceptibles a las inestabilidades geopolíticas, el uranio se produce en países que son sociopolíticamente estables. El uranio tiene la ventaja de ser una fuente de energía altamente concentrada que es fácil de extraer y barato de transportar. Las cantidades necesarias son mucho menores que las del carbón o el petróleo (World Nuclear Association, 2022).

### Front end fuel cycle costs of 1 kg of uranium as UO<sub>2</sub> fuel

Process	Amount required x price*	Cost	Proportion of total
Uranium	8.9 kg U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> x \$94.6/kg	\$842	51%
Conversion	7.5 kg U x \$16	\$120	7%
Enrichment	7.3 SWU x \$55	\$401	24%
Fuel fabrication	per kg	\$300	18%
Total		\$1663	

Figura 15. Precio total del combustible nuclear (World Nuclear Association, 2022)

En la Figura 15 se muestra el precio de 1kg de procesar uranio y transformarlo en combustible nuclear. El uso de los recursos naturales de una central nuclear se explica en el capítulo 4.2.

La eliminación de residuos nucleares constituye un porcentaje aproximado del 10% de los costos totales por kWh de una central nuclear. Por otro lado, los costos de desmantelamiento de una central nuclear representan entre el 9% y el 15% del coste de capital inicial de la instalación (World Nuclear Association, 2022).

La vida de diseño de una central nuclear de segunda generación se establece en aproximadamente 40 años. Durante este periodo, la central opera bajo condiciones de seguridad y rentabilidad óptimas, y coincide con el tiempo necesario para amortizar la inversión. Un tiempo de vida de diseño menor haría que la construcción de una central nuclear no fuera rentable. El objetivo de una central nuclear es generar electricidad e ingresos, en el monte que una central nuclear deja de ser rentable se cierra, como pasó con la central nuclear española de José Cabrera.

La vida útil de una central nuclear es el período durante el cual funciona de forma segura y eficiente, cumpliendo con los requisitos de la normativa vigente. La vida útil puede superar la vida de diseño después de la realización de una evaluación exhaustiva para asegurar los requisitos de seguridad y eficiencia. En España la instrucción IS-22 del Consejo de Seguridad Nuclear establece los requisitos de seguridad necesarios para la gestión de las operaciones a largo plazo una vez la central ha superado la vida de diseño. Los organismos reguladores de cada país, en España el CNS, realizan inspecciones periódicas a las centrales nucleares, estas se intensifican con las centrales que operan a largo plazo. En cada planta nuclear existe un equipo de profesionales encargados de realizar los estudios necesarios para determinar si la instalación está preparada para operar más allá de su vida de diseño, basándose en múltiples parámetros (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023).

Es importante señalar la elevada fiscalidad de la energía nuclear, una de las más altas de las diferentes tecnologías energéticas.

Como se observa en Figura 16 la presión fiscal sobre la energía nuclear ha aumentado un 430% desde el año 2008 en España. Los impuestos asociados a esta tecnología se encuentran por encima de los 20 euros el MWh, en el año 2020 el 60% de los ingresos de las centrales nucleares fueron destinados al pago de impuestos y tasas (Energía y Sociedad, 2021).

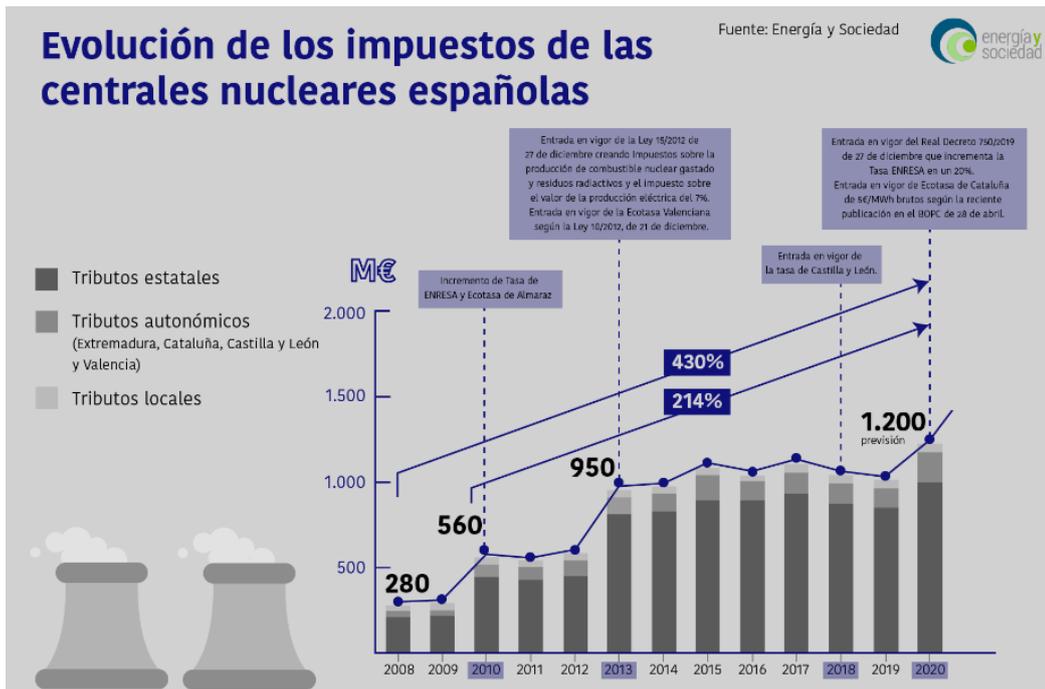


Figura 16. Evolución de los impuestos de las centrales nucleares en España (Energía y Sociedad, 2021)

Los gastos medios de O&M en 2022 de los reactores de segunda generación ascienden a 23 dólares el MWh mientras que en los de tercera generación se reduce hasta los 14 dólares el MWh al año. El número de unidades de reactores operativos dentro de la misma central disminuye los gastos de O&M. Según los datos del informe del MIT los gastos de O&M de una central nuclear con dos unidades del reactor AP1000 es de 11 dólares el MWh y con cuatro unidades tiene un precio de 9 dólares el MWh (Shirvan, 2022).

En la Tabla 4 se observa el coste de O&M anual de un reactor AP1000 en comparación a los costes de la generación segunda de reactores. El precio medio de O&M de los reactores de segunda generación es de 180 millones de dólares anuales mientras que el de un reactor AP1000 es de 128 millones de dólares anuales. El reactor AP1000 es una mejora evolutiva de los reactores PWR de segunda generación, se han introducido mejores en térmicos de seguridad y eficiencia consiguiendo al mismo tiempo una reducción en los gastos de O&M.

Categories	GENII Staff	GENII Cost (\$M)	AP1000 Staff	AP1000 Cost (\$M)
<b>Engineering</b>	68	12.4	59	10.8
<b>Loss Prevention</b>	132	21.8	72	11.9
<b>Materials &amp; Services</b>	18	3.2	18	3.2
<b>Fuel Management</b>	7	1.0	7	1.0
<b>Operations</b>	136	27.4	86	17.3
<b>Training</b>	31	4.2	31	4.2
<b>Work Management</b>	158	43.8	112	31.1
<b>Support Services Staff</b>	49	9.0	19	3.5
<b>Support Services*</b>	--	43.0	--	30.1
<b>Fixed Fees**</b>	--	15.0	--	15.0
<b>Total</b>	599	180.9	404	128.0
<b>Levelized (\$/MWhre)</b>	--	22.9	--	14.1

Tabla 4. Gasto de operación y mantenimiento de un reactor (Shirvan, 2022)

El coste del sistema es un aspecto económico importante para considerar en la generación de energía, este se refiere a los gastos adicionales asociados con la integración y gestión de las fuentes de energía en el sistema eléctrico. Esto incluye los costes necesarios para garantizar un suministro de energía confiable, seguro y eficiente para satisfacer la demanda eléctrica de manera constante.

Mientras que las fuentes de energía gestionables o controlables, como la nuclear, tienen un coste mínimo para satisfacer la demanda real de la red, las energías renovables dependen de la disponibilidad ocasional de recursos naturales y presentan mayores desafíos en términos de costes del sistema (World Nuclear Association, 2006).

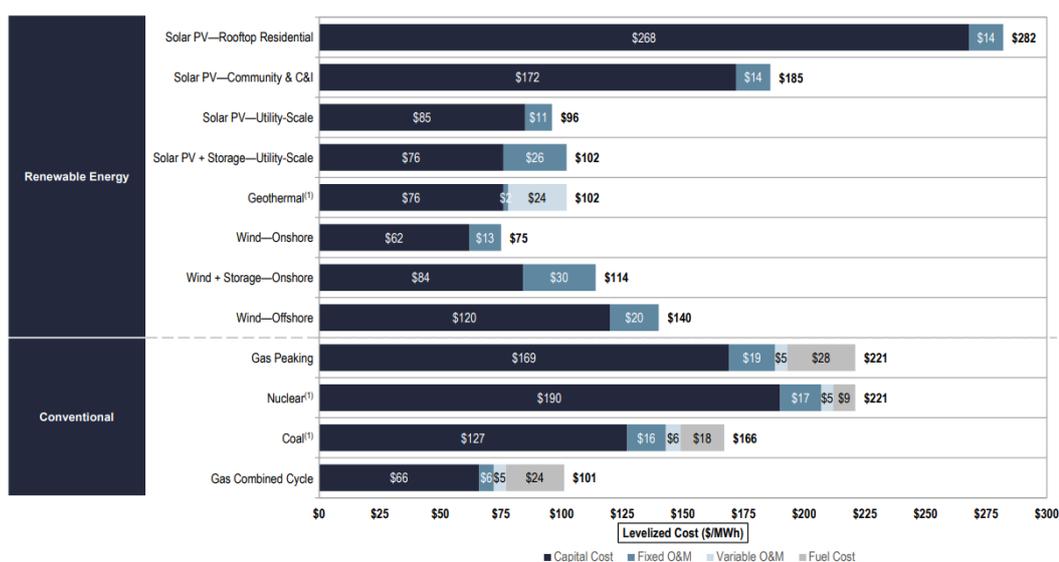
## 3.4. El LCOE de la energía nuclear

Para evaluar el coste de explotación de las tecnologías energéticas a lo largo de su vida útil se emplea el concepto de coste nivelado de la energía (LCOE).

El LCOE representa el precio al que la electricidad debe ser generada para que el proyecto alcance el punto de equilibrio, teniendo en cuenta todos los costes durante la vida útil de la central, la inflación y el coste de oportunidad del capital mediante la aplicación de una tasa de descuento. Este precio también representa el precio mínimo de la energía para compensar todos los gastos por ello el precio de venta de la energía tiene que ser superior al LCOE.

Existen tecnologías energéticas las cuales son muy baratas cuando están produciendo electricidad como la eólica o la solar, pero hay que tener en cuenta el precio de los procesos de minería para extraer los materiales necesarios para la fabricación de las placas solares o los aerogeneradores además del precio de su desmantelamiento y la gestión de los residuos tóxicos, mediante el uso del coste nivelado de la energía todos estos costes se tienen en consideración.

En la Figura 17 se observa el LCOE de las distintas tecnologías energéticas en 2023, en este caso se representa el LCOE máximo o alto. En este informe observamos que la energía nuclear tiene un LCOE superior a la mayoría de las energías renovables y semejante a los combustibles fósiles a excepción de ciclo de gas combinado. No es una de las tecnologías más caras, pero tiene un precio elevado.



LAZARD  
Copyright 2023 Lazard

Source: Lazard and Roland Berger estimates and publicly available information.

Notes:

(1) Figures may not sum due to rounding. Given the limited public and/or observable data set available for new-build geothermal, coal and nuclear projects, and the emerging range of new nuclear generation strategies, the LCOE presented herein represents Lazard's LCOE v15.0 results adjusted for inflation and, for nuclear, are based on then-estimated costs of the Vogtle Plant and are U.S.-focused.

13

Figura 17. LCOE de las distintas tecnologías energéticas en 2023 (Lazard, 2023)

Su LCOE está constituido por 190 dólares/MWh que representan la inversión en capital para poner una central nuclear en marcha, 17 dólares/MWh que representan los gastos de operación y mantenimiento, 5 dólares/MWh de gastos variables y unos 9 dólares/MWh de combustible. La energía nuclear es la tecnología de generación cuyo gasto de combustible es el menor en comparación a las que utilizan combustibles fósiles. El LCOE total de la energía nuclear son 141 dólares.

El LCOE de cada tecnología varía en función de cada país, este es una media mundial, este valor es elevado por la alta inversión inicial que supone una central nuclear.

El informe *Projected Costs of Generating Electricity 2020* elaborado por la Agencia Internacional de la Energía y la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE proporciona datos sobre el LCOE de las tecnologías energéticas. Este recopila información de costes de 243 centrales eléctricas ubicadas en 24 países, tanto dentro como fuera de la OCDE (International Energy Agency, 2020).

Este informe muestra que la operación a largo plazo de las centrales térmicas nuclear constituye la opción más económica para la generación de energía, este coste bajo es posible debido a que estas centrales nucleares ya han sido amortizadas, han superado los 40 años de vida útil de diseño y cuentan con autorización para operar a largo plazo. Se espera que en los próximos años las centrales nucleares sean más asequibles que las centrales térmicas convencionales por el aumento de la fiscalidad a la emisiones y el aumento de los precios de los combustibles fósiles.

La electricidad producida a partir las centrales nucleares a largo plazo (LTO) es muy competitiva, producen energía eléctrica asequible con bajas emisiones de CO<sub>2</sub>.

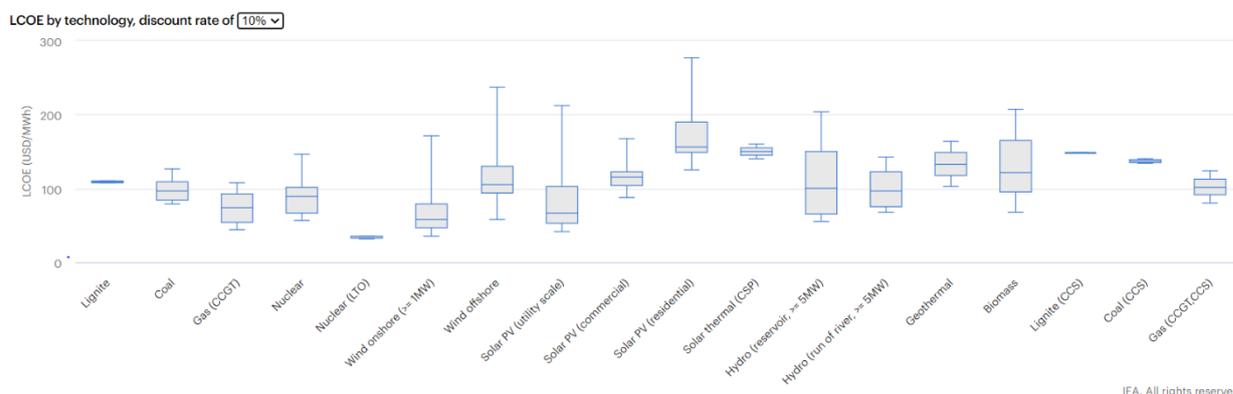


Figura 18. LCOE de las distintas tecnologías energéticas. (International Energy Agency, 2020)

En la Figura 18 se el LCOE de diferentes tecnologías energéticas según este informe. Se observa que el LCOE de las centrales nucleares de nueva construcción se mantiene por debajo de los 100 dólares/MWh, mientras que el LCOE de las centrales nucleares de larga operación (LTO) se sitúa por debajo de los 40 dólares/MWh, siendo la opción más económica. Como ya he mencionado el 60% de la LCOE de la energía nuclear está determinado por su inversión inicial por ello una vez que la plata nuclear está amortizada es un opción rentable para producir energía eléctrica.

Los costes de las energías renovables han disminuido en los últimos años, lo que las hace más competitivas. Sin embargo, la falta de fiabilidad de las energías renovables requiere respaldos con sistemas de almacenamiento de energía o la utilización de tecnologías más seguras y confiables para garantizar el suministro eléctrico.

Los costes nivelados de generación de electricidad de las tecnologías con bajas emisiones de carbono están disminuyendo y se sitúan por debajo de los costes de las tecnologías convencionales basadas en combustibles fósiles.

La energía nuclear de larga operación se espera que siga siendo la tecnología de menor costo en el futuro, junto con grandes embalses hidroeléctricos, aunque estos últimos dependen de las características geográficas de cada país. Ambas son tecnologías flexibles, de larga vida útil y con bajas emisiones de carbono.

Los cálculos del LCOE en este informe se han realizado teniendo en cuenta los costes medios nivelados durante la vida útil, utilizando el método del flujo de caja descontado. Para el cálculo también se han tenido en cuenta los costes de las emisiones de dióxido de carbono, unos 30 dólares la tonelada de CO<sub>2</sub>.

Cuanto mayor sea la inversión inicial de una tecnología energética más sensible será su LCOE a las variaciones del tipo de descuento. Los costes de las nuevas centrales nucleares dependen del tipo de descuento. Con un tipo de descuento bajo del 3%, que refleja un entorno de mercado estable con una elevada seguridad de inversión, el LCOE de las nuevas centrales nucleares es inferior al de las nuevas centrales de carbón y gas. Con tasas de descuento más altas, del 7% o el 10%, que reflejarían entornos económicos más arriesgados, los costes de una central nuclear de nueva construcción superarían a los de las centrales térmicas de combustibles fósiles.

Las centrales nucleares de nueva construcción tienen un elevado LCOE mientras que las centrales de larga operación poseen el más bajo de todas las tecnologías.

# Capítulo 4. Análisis medioambiental

Todas las fuentes de generación de energía tienen efectos negativos sobre el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida. Podemos clasificar las fuentes de energía en dos categorías:

- Fuentes de energía que emiten gases de efecto invernadero durante su ciclo de generación, en esta categoría se incluyen los combustibles fósiles y el biocombustible.
- Fuentes de energía que no emiten gases de efecto invernadero durante su ciclo de generación, en esta categoría se incluyen las energías renovables y la energía nuclear.

La energía nuclear destaca por no emitir gases de efecto invernadero durante su ciclo de operación, la energía eléctrica se obtiene a partir de la fisión del combustible nuclear dentro del reactor (Anexo 1). Esta característica hace que la energía nuclear sea considerada una tecnología que puede ayudar a mitigar los efectos del calentamiento global. Dado que más del 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero provienen de la generación de energía, es imprescindible utilizar fuentes de energía con bajas emisiones para lograr la descarbonización de nuestra sociedad y reducir la contaminación. Los combustibles fósiles son los más contaminantes y debe evitarse su uso.

La investigación y la inversión en energías renovables es esencial pero el ser humano no puede controlar la naturaleza y estas fuentes de energía dependen del azar, por ello necesitan del apoyo de otra tecnología energética complementaria que pueda proporcionar energía de forma limpia y constante. La energía nuclear puede contribuir en la mitigación de los efectos del calentamiento global y algunos de los objetivos del desarrollo sostenible.

Las centrales nucleares están sujetas a estrictos controles reglamentarios e institucionales que no se aplican en otras actividades industriales, las consecuencias de un accidente nuclear pueden ser catastróficas tanto para el

medio ambiente como para la salud de las personas. Por lo tanto, la seguridad es el parámetro principal de funcionamiento. Durante la fisión nuclear se emite radiación, esta puede alterar el ADN de las células de los seres vivos, estas mutaciones a su vez pueden derivar en enfermedades como el cáncer. El marco reglamentario abarca todas las etapas del ciclo de producción nuclear y garantiza la protección de los trabajadores, la sociedad y el medio ambiente (Anexo 2).

La seguridad es el principal enfoque en todas las etapas de la actividad nuclear, desde el diseño y la construcción de las centrales hasta su operación, desmantelamiento y cierre.

Las centrales nucleares cuentan con diversos sistemas de seguridad multi-barrera, hay incluso medidas de seguridad que se duplican para poder proporcionar una respuesta efectiva en caso de accidente.

Los efectos de un accidente nuclear pueden tener graves consecuencias tanto para el medio ambiente como para la salud, por ello el diseño de las centrales no es estático y varía con el tiempo. Durante las paradas de recarga del combustible que se realizan aproximadamente cada 12 meses, este tiempo depende del tipo de reactor, se realizan diversas tareas de mantenimiento y se realizan cambios en el diseño para incrementar y reforzar la seguridad. Las causas de los accidentes nucleares pueden ser muy diversas y algunas imprevisibles. Cuando tiene lugar un accidente, se analizan sus causas, los fallos humanos, los fallos de seguridad y el protocolo seguido para resolver el problema. Una vez analizados todos los datos y las causas del incidente se proceden a la realización de mejoras en los sistemas de seguridad, estas mejoras se implementan en todas las centrales nucleares del mundo para evitar o reducir las posibilidades de que pueda volver a ocurrir un accidente similar en el futuro.

Existen diversos mecanismos de cooperación internacional nucleares para prevenir accidentes nucleares y fomentar el intercambio de experiencias operativas entre centrales.

En este capítulo, se analizarán las consecuencias y el impacto de la energía nuclear en el medio ambiente. Se comenzará por examinar las emisiones de gases de efecto invernadero de la energía nuclear. Luego se abordará el tema de los residuos nucleares y su gestión, que suele ser uno de los aspectos más controvertidos. También se tratará la seguridad nuclear y el riesgo de accidentes, así como el consumo de recursos naturales. Por último, se expondrá el impacto de esta tecnología en la sociedad y la biodiversidad. El objetivo es ofrecer un análisis completo y fundamentado en evidencia científica sobre la energía nuclear, permitiendo una evaluación de sus beneficios y desafíos en relación con el medio ambiente.

## 4.1. Las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales nucleares

El desarrollo de las naciones conlleva un incremento en el consumo energético, el crecimiento económico es vital para todos los países, por ello conseguir un crecimiento económico sostenible adquiere relevancia en la mitigación de los efectos negativos del cambio climático generados por la actividad humana. El crecimiento económico requiere energía y nuestra sociedad moderna cada vez demanda mayor cantidad de energía eléctrica, sin embargo, el calentamiento global se ha convertido en un problema grave para la vida en la tierra.

La humanidad debe enfrentarse a un desafío sin precedentes, deben mitigar los efectos del calentamiento global y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, asegurando y proporcionando al mismo tiempo la creciente demanda de energía eléctrica.

La actividad humana está teniendo varias consecuencias negativas sobre el planeta, siendo una de las más preocupantes el aumento medio de la temperatura global (calentamiento global). Este fenómeno se atribuye principalmente a la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera derivadas de la actividad industrial. Sin embargo, no solo debemos considerar las emisiones de los gases de efecto invernadero, sino también el aumento de gases y partículas contaminantes presentes en la atmósfera, las cuales empeoran la calidad de vida de los seres vivos y tienen consecuencias perjudiciales para la salud.



*Figura 19. Smog en la ciudad de Madrid (García Gallo, 2013)*

En la Figura 19 se observa el smog en la ciudad de Madrid, el smog es una de las consecuencias de la contaminación ambiental, este se produce por grandes cantidades de contaminación atmosférica. Su origen radica en los gases contaminantes de la industria y de los vehículos de combustión interna.

El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático. Sin embargo, este no es el único gas de efecto invernadero que influye en el cambio climático, hay otros que también juegan un papel importante como el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y los gases fluorados.

El CO<sub>2</sub> es responsable de aproximadamente el 75% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero y puede permanecer en la atmósfera durante largos períodos de tiempo, incluso miles de años. Las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen principalmente de la quema de materia orgánica, como carbón, petróleo, gas, madera y residuos sólidos (National Geographic, 2023).

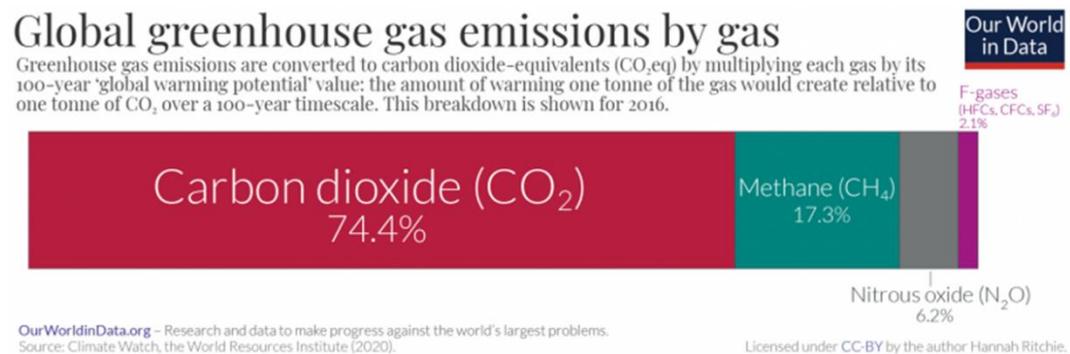


Figura 20. Emisiones de los gases de efecto invernadero en el año 2016 (Our world in data, 2023)

En la Figura 20 se observa el porcentaje de las emisiones de los gases de efecto invernadero, las emisiones del dióxido de carbono alcanzaron en 2016 el 74,4% del total.

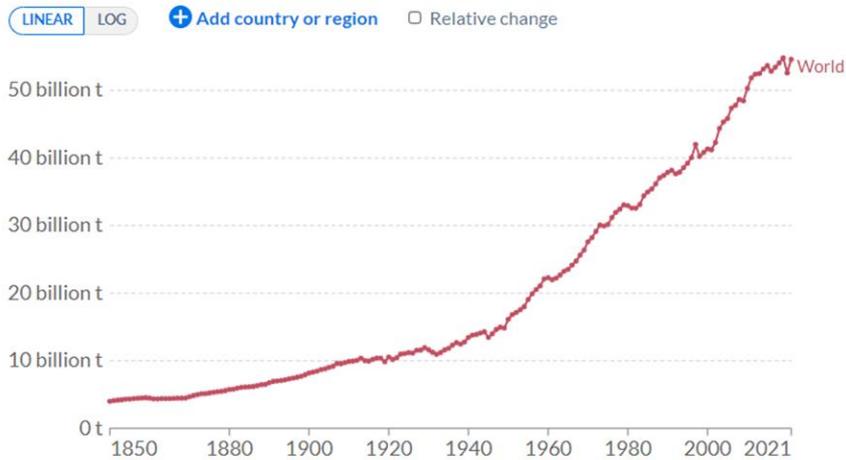
Los gases de efecto invernadero son un peligro para medio ambiente, la salud de las personas y la supervivencia de todos los seres vivos del planeta. Estos gases provocan el cambio climático al contribuir al efecto invernadero, atrapando los rayos solares en la atmosfera y produciendo un aumento en la temperatura. También contribuyen a las enfermedades respiratorias causadas por la contaminación atmosférica provocada por las partículas suspendidas en el aire.

En la Figura 21 se muestra la evolución de las emisiones de los gases de efecto invernadero hasta el 2021. Las emisiones actuales de gases de efecto invernadero rondan los 50 billones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes al año. Estas emisiones no dejan de incrementar con el paso del tiempo.

## Greenhouse gas emissions

Our World in Data

Greenhouse gas emissions include carbon dioxide, methane and nitrous oxide from all sources, including agriculture and land use change. They are measured in carbon dioxide-equivalents over a 100-year timescale.



Source: Calculated by Our World in Data based on emissions data from Jones et al. (2023)

Note: Land use change emissions can be negative.

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY

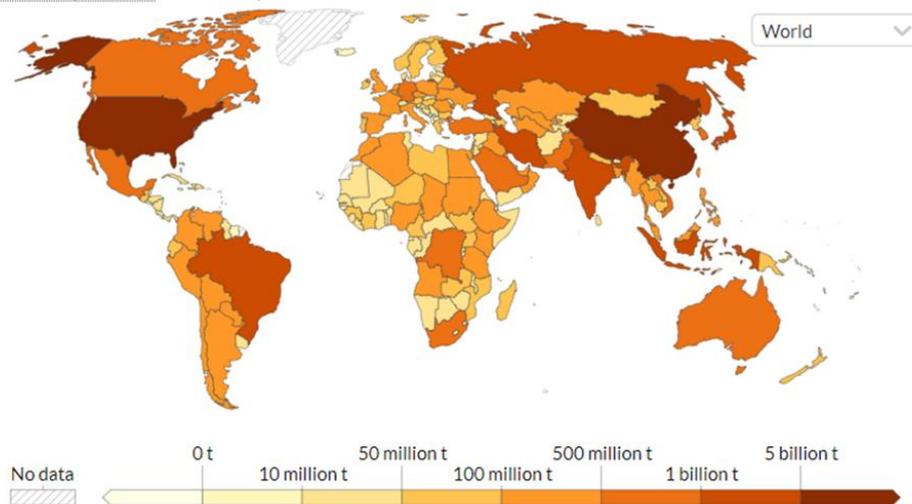
Figura 21. Emisiones de los gases de efecto invernadero (Our world in data, 2023)

En el mapa 4 se muestran las emisiones de los gases de efecto invernadero de los diferentes países en el año 2021.

## Greenhouse gas emissions, 2021

Our World in Data

Greenhouse gas emissions include carbon dioxide, methane and nitrous oxide from all sources, including agriculture and land use change. They are measured in carbon dioxide-equivalents over a 100-year timescale.



Source: Calculated by Our World in Data based on emissions data from Jones et al. (2023)

Note: Land use change emissions can be negative.

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Mapa 4. Emisiones de los gases de efecto invernadero (Our world in data, 2023)

Estos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero son muy preocupantes y a lo largo del último siglo solo han ido aumentando.

En 2015, se estableció el Acuerdo de París, un tratado internacional adoptado durante la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Su objetivo primordial es abordar el cambio climático y limitar el calentamiento global a niveles inferiores a 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y realizar esfuerzos para limitarlo a 1,5°C.

El Acuerdo de París busca alcanzar este objetivo mediante la implementación de acciones de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, adaptación a los impactos del cambio climático, cooperación internacional y movilización de financiamiento para respaldar a los países en desarrollo en sus esfuerzos contra el cambio climático.

El Acuerdo de París es considerado un hito importante en los esfuerzos globales para abordar el cambio climático, ya que establece un marco global para la cooperación y la acción climática a largo plazo.

Existen importantes riesgos para la salud humana y del resto de las especies del planeta si superamos ese límite de 1.5°C. Esto ha derivado en la necesidad de adaptar medidas más urgentes y restrictivas para frenar este aumento de temperatura y evitar sus peores consecuencias.

Los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, son los principales impulsores del cambio climático, ya que generan más del 70% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero y aproximadamente el 90% de las emisiones de dióxido de carbono. Como he mencionado anteriormente, la emisión de estos gases a la atmósfera conlleva consecuencias negativas y representa un riesgo. Las actividades humanas relacionadas con la producción de energía, la industria, la deforestación, el transporte y la ganadería son las principales causas del cambio climático.

Los efectos del calentamiento global son muy diversos e incluyen el aumento de la temperatura media, eventos climáticos extremos, la destrucción de cosechas y la pérdida de especies. La contaminación procedente de los combustibles fósiles provoca la muerte de 7 millones de personas al año según la World Healthy Organization (García Fernadéz, 2020).

## El reparto de la contribución al cambio climático

### Emisiones de gases de efecto invernadero globales por sectores (2016)

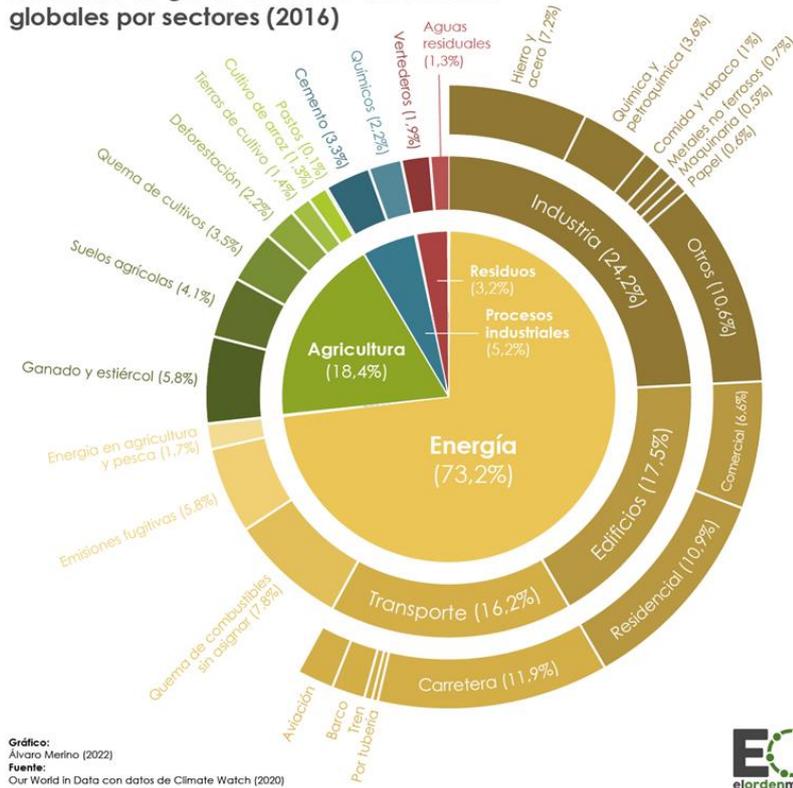
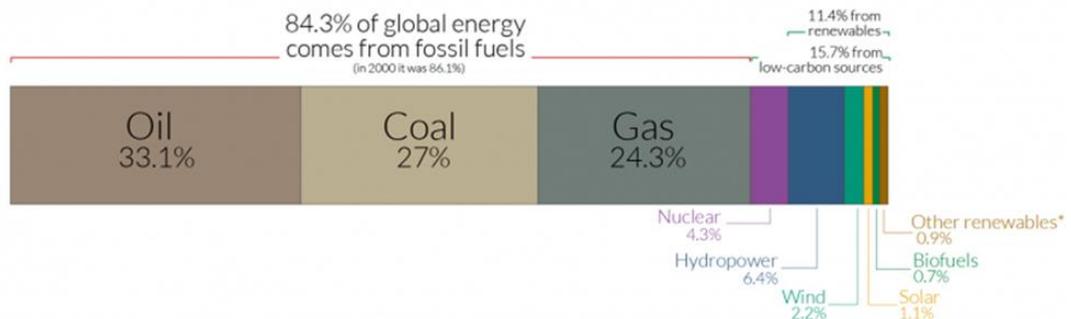


Figura 22. Emisiones gases de efecto invernadero por sector en e laño 2016 (El Orden Mundial, 2023)

En la Figura 22 se presentan las emisiones de los gases de efecto invernadero distribuidos por sectores, el 73,2% de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2016 eran procedentes de la generación de energía.

## Global primary energy consumption by source

The breakdown of primary energy is shown based on the 'substitution' method which takes account of inefficiencies in energy production from fossil fuels. This is based on global energy for 2019.



\*'Other renewables' includes geothermal, biomass, wave and tidal. It does not include traditional biomass which can be a key energy source in lower income settings.

OurWorldInData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.  
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2020).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

Figura 23. Origen de la consumo global de la energía primaria (Our world in data, 2023)

En la Figura 23 se observa que la consumición mayoritaria de energía primaria proviene de fuentes de energías fósiles, principalmente del petróleo, carbón y gas.

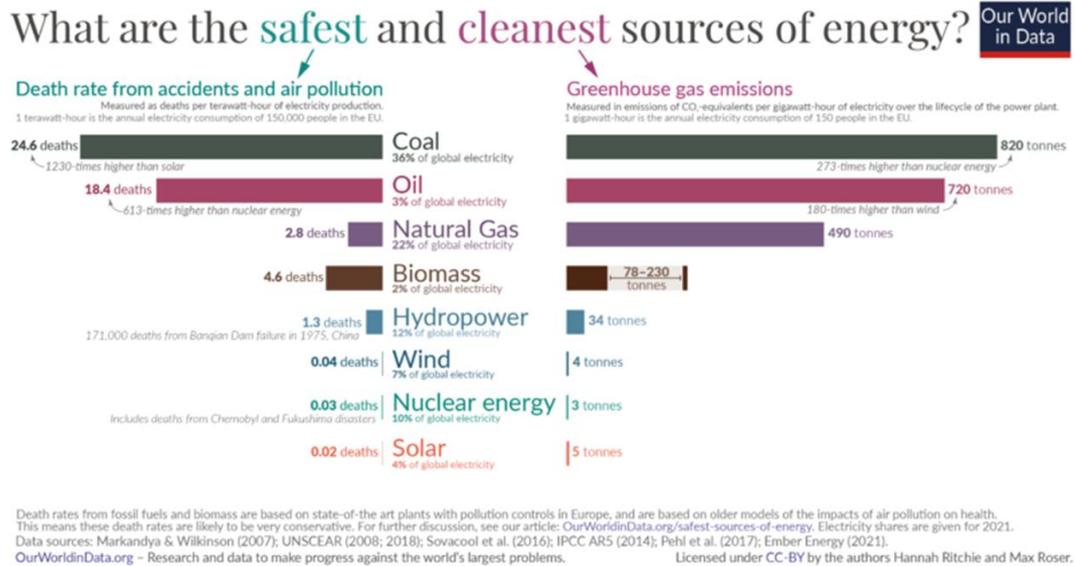


Figura 24. Emisiones de gases de efecto invernadero y ratio de muertes de las fuentes de energía primarias (Our world in data, 2023)

En la Figura 24 se manifiestan las emisiones de los gases de efecto invernadero de las diferentes fuentes de energía primarias. Las fuentes de energía más empleadas en el mundo son a la vez las más contaminantes y peligrosas para el ser humano.

Para poder alcanzar los objetivos acordados en el Acuerdo de París, las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la generación de energía deben reducirse, las necesidades energéticas en todo el mundo no dejan de aumentar y cada vez vamos ampliando sus usos finales como en el transporte. La energía nuclear puede desempeñar un papel fundamental para cumplir con las restricciones de emisiones para poder luchar contra el cambio climático. Los países que cuentan con programas nucleares poseen una huella de carbono 19% inferior que la media mundial

La energía nuclear es una fuente de energía de bajas emisiones, la cual juega un papel fundamental en la transición hacia un futuro de energía limpia. Todas las fuentes de energía tienen una repercusión medioambiental negativa en algún momento de su ciclo de vida. En el caso de la energía nuclear, esta no produce emisiones a lo largo de su ciclo de operación, pero sí durante otros procesos como pueden ser la minería del combustible, el transporte, la construcción de las instalaciones o durante las pruebas de seguridad de los generadores diésel de emergencias.

No obstante, las emisiones de CO<sub>2</sub> de la energía nuclear son equiparables a las emitidas por fuentes de energía renovables, como podemos observar en la Figura 25.



Figura 25. Emisiones de dióxido de carbono del ciclo de vida de las distintas tecnologías energéticas (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)

Existe un esfuerzo global por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el calentamiento global, la energía nuclear puede ser clave en este proceso, no emite emisiones de gases invernadero ni de partículas contaminantes.

La sociedad se encuentra en un proceso de descarbonización, enfocándose en fuentes de energía limpias y renovables. Sin embargo, estas fuentes renovables son intermitentes y dependen de factores meteorológicos impredecibles. Aunque es fundamental invertir en energías renovables, se requiere una fuente de energía base que pueda garantizar un suministro constante y adecuado en todo momento complementando a las renovables, y es aquí donde la energía nuclear juega un papel relevante.

La energía nuclear es un aliado imprescindible de las energías renovables para reducir la utilización de combustibles fósiles y por tanto reducir las emisiones y frenar el calentamiento global asegurando al mismo tiempo el suministro de energía. El consumo de carbón, gas natural y el petróleo producen altas emisiones de gases de efecto invernadero, por ello continuar empleando estas fuentes de energía como energía base solo contribuye a la degradación del medio ambiente.

Dada la urgencia climática habría que apostar por producir la mayor cantidad de energía a través de fuentes de bajas emisiones de carbono y la nuclear es una de ellas. Según la Agencia Internacional de la Energía para poder cumplir con el acuerdo de París la potencia nuclear instalada debe aumentar significativamente para lograr el objetivo de aumentar el porcentaje de electricidad generada proveniente de fuentes de energía no contaminantes. La energía nuclear puede contribuir de forma significativa para lograr los objetivos de sostenibilidad y mejora de la seguridad energética.

La energía nuclear no es la única herramienta para poder frenar el calentamiento global, también hay que destacar a las energías renovables o la captación de carbono.

En la Unión Europea se están tomando muchas medidas y acciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación, una de las más recientes es la prohibición de la venta de vehículos de combustión interna en el 2035.

El incremento de los precios de la energía y la crisis climática han generado un debate en torno al papel de la energía nuclear. Mientras que algunos países de la Unión Europea la consideran una fuente de energía verde, no todos los Estados miembros están de acuerdo con esta clasificación. La Comisión Europea emitió un informe en el que reconoce a la energía nuclear y al gas natural como energías verdes.

La postura de los países europeos con respecto a la energía nuclear varía significativamente. Algunos países defienden su uso debido a su baja huella de carbono y su potencial para reemplazar los combustibles fósiles en la transición hacia una economía más ecológica. Sin embargo, otros países expresan preocupación por los posibles impactos negativos de los accidentes nucleares, como los desastres ocurridos en Chernóbil en 1986 y Fukushima en 2011, así como los desafíos asociados con la gestión de los residuos nucleares.

Francia se destaca dentro de la Unión Europea por su fuerte dependencia de la energía nuclear. Desde la década de 1970, el país ha implementado un programa nuclear con el objetivo de generar su electricidad a partir de la fisión nuclear. Actualmente, alrededor del 70,6% de la generación total de electricidad en Francia proviene de la energía nuclear. Francia también se ha convertido en uno de los principales exportadores de electricidad en Europa debido a su capacidad nuclear. Otros países, como Polonia, están siguiendo el ejemplo de Francia y planean construir centrales nucleares. Polonia emite una cantidad significativa de gases de efecto invernadero debido a su dependencia del carbón, tiene previsto completar su primer reactor nuclear destinado a la generación de electricidad en 2033, y planea construir un total de seis plantas nucleares en el futuro.

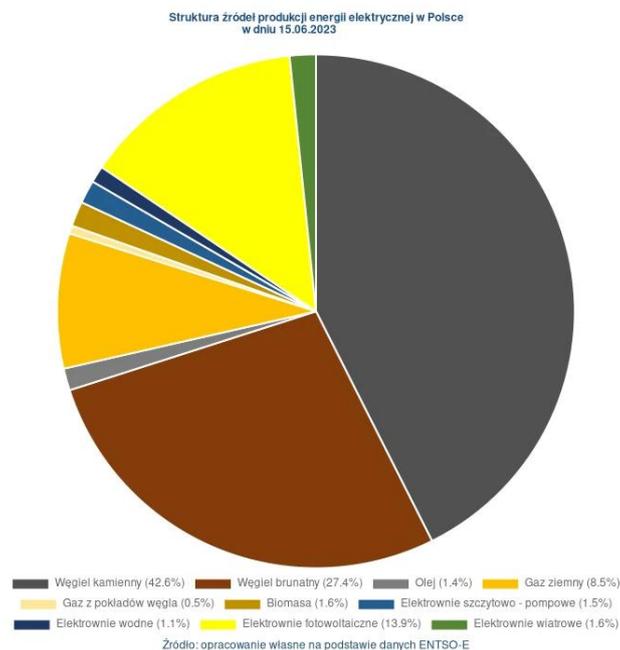
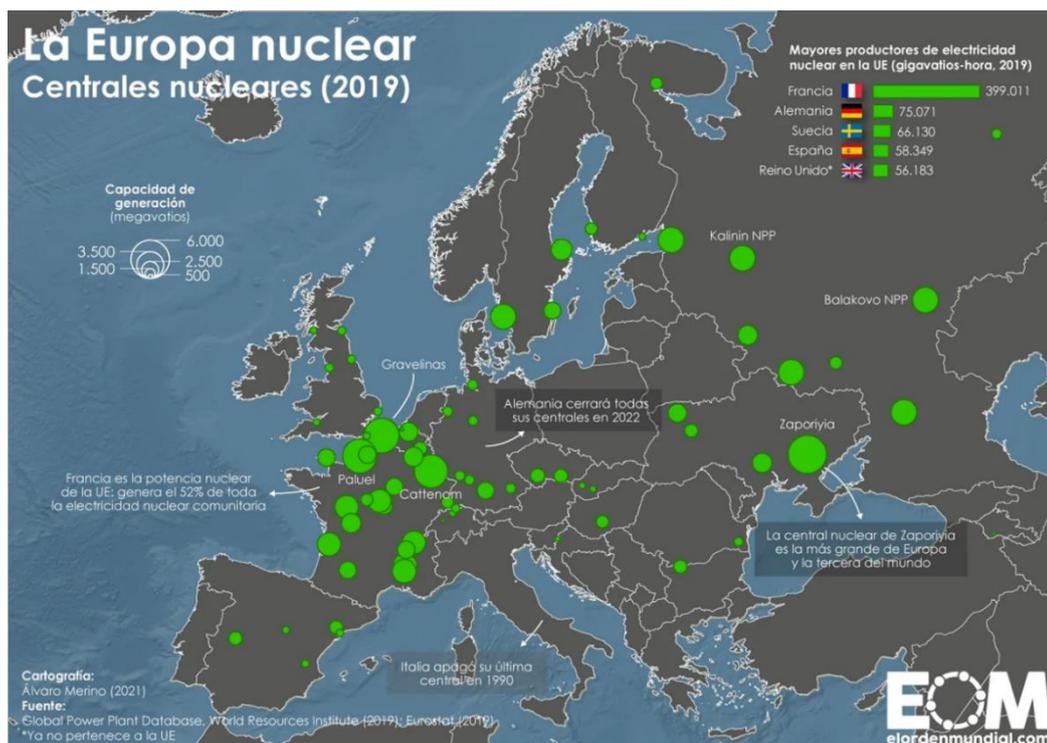


Figura 26. Producción de energía eléctrica en Polonia, junio 2023 (CIRE PL, 2023)

En la Figura 26 se muestra la producción de energía eléctrica en Polonia el día 15 de junio del 2023. El 70% de la energía generada proviene del carbón.

La producción de cada país está condicionada por sus recursos naturales, en el caso de Polonia, esta cuenta una gran cantidad de carbón. Al emitir tantos gases de efecto invernadero procedentes de la generación de energía el gobierno polaco pretende reducir las emisiones de dióxido de carbono empezando a emplear la energía nuclear. Polonia ya cuenta con un reactor nuclear, este es su segundo reactor de investigación y es el único que continua en uso. El reactor se llama Maria en honor a Maria Skłodowska-Curie y es el único reactor de diseño polaco.

Los países de la UE que pidieron a la Comisión Europea que la energía nuclear se declarara energía verde fueron: Francia, Bulgaria, Chequia, Croacia, Eslovaquia, Eslovenia, Finlandia, Hungría, Polonia, Rumanía, Países Bajos y Suecia. Son 12 países posicionados a favor de la energía nuclear. El Gobierno de España es uno de los que se opone a considerar energía verde tanto a la nuclear como a al gas natural.



Mapa 5. Centrales nucleares en Europa en el año 2019 (El Orden Mundial, 2023)

En el mapa 5 se muestran las centrales nucleares en Europa en el año 2019. Alemania este 2023 ha puesto fin a la era nuclear apagando sus últimos reactores, España y Bélgica también tienen programado un apagón nuclear.

La energía nuclear es considerada por muchos Estados miembros como el futuro y la clave de una descarbonización efectiva y eficiente. Nos enfrentamos a una crisis energética en la que los precios no dejan de subir mientras que cada vez es más difícil cumplir con los objetivos marcados para reducir emisiones en la Unión Europea. El precio de los combustibles aumenta al igual que la fiscalidad al dióxido de carbono.

Alemania y Francia han adaptado enfoques opuestos en cuanto a la energía nuclear. El 15 de abril de 2023, Alemania apagó de forma definitiva los tres reactores nucleares que aún estaban en funcionamiento, marcando su renuncia total a la energía nuclear después de 60 años de producción.

Esta decisión de apagar los reactores nucleares ha recibido críticas tanto desde el ámbito político como desde la industria. Algunos argumentan que renunciar a una fuente de energía disponible y más limpia que los combustibles fósiles es irresponsable, especialmente en un momento en el que la seguridad energética es una preocupación.

Por otro lado, Francia es el país más nuclearizado de Europa y sigue apostando por la energía nuclear como parte de su estrategia energética. Cuenta con 56 reactores nucleares en operación, que pueden suministrar más del 70% de la electricidad generada en el país. Francia ha decidido prolongar la vida útil de sus reactores a más de 40 años y ha iniciado la construcción de nuevos reactores.

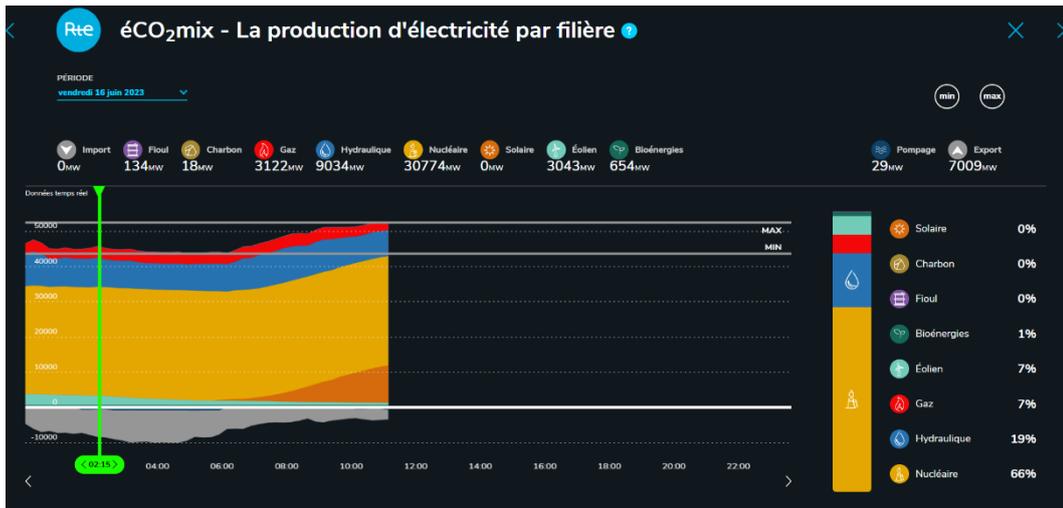


Figura 27. Producción de energía eléctrica en Francia, 16 de junio del 2023 (RTE France, 2023)

En la Figura 27 observamos el origen de la producción de la energía en Francia el 16 de junio del 2023. Dependiendo de la hora del día el porcentaje aportado por la energía nuclear es mayor, este porcentaje puede alcanzar el 70% cuando la aportación de las energías renovables es insuficiente.

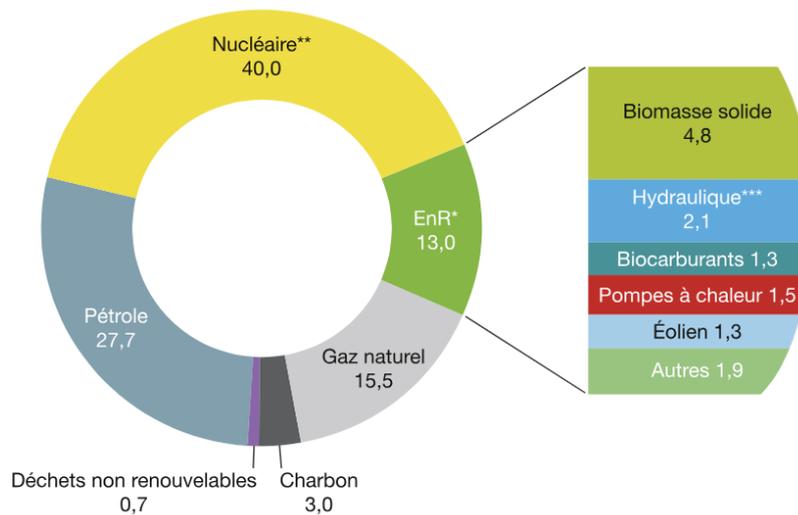


Figura 28. Origen de la energía consumida en Francia año 2021 (Notre-Environnement, 2023)

En la Figura 28 se presenta el origen de la energía consumida en Francia en el año 2021. Sólo el 40% del total de la energía consumida en el país era de origen nuclear.

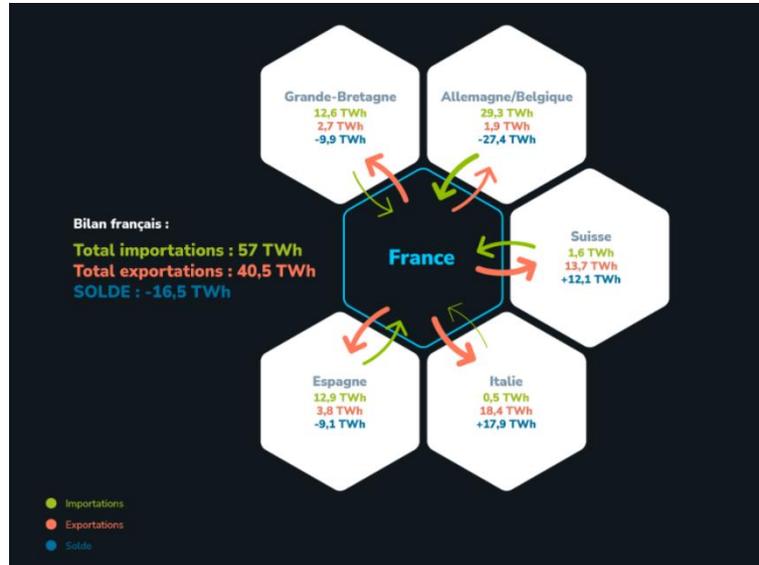


Figura 29. Importaciones y exportaciones de energía en Francia año 2021 (RTE France, 2023)

En la Figura 29 se muestran las importaciones y exportaciones de energía realizadas por Francia, en el año 2021 Francia importaba más energía de la que exportaba.

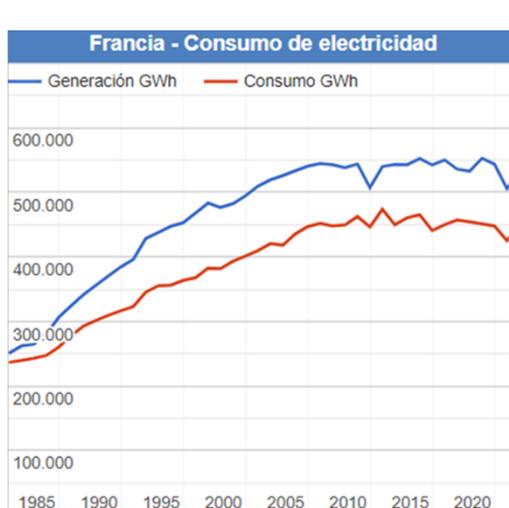


Figura 30. Consumo y generación de electricidad en Francia. Fuente: Datos Macro

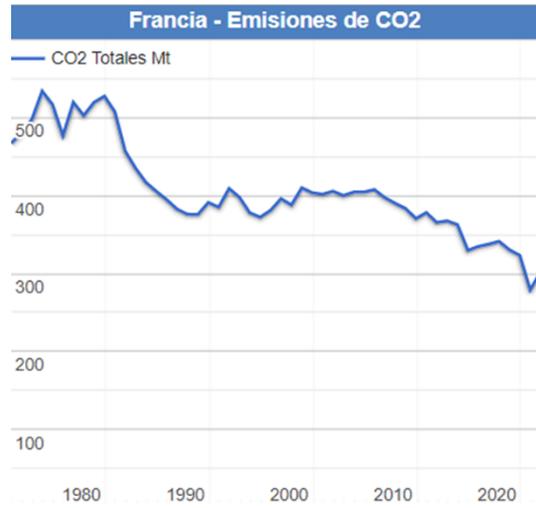


Figura 31. Emisiones de CO2 en Francia. Fuente: Datos Macro

En la Figura 30 se observa la generación y consumición de electricidad en Francia y en la Figura 31 las emisiones de dióxido de carbono.

Los datos de Francia muestran como el uso de la energía nuclear puede ayudar a reducir las emisiones, en la década de 1980 Francia redujo de forma significativa sus emisiones de dióxido de carbono mediante la implementación de energía nuclear.



Mapa 6. Emisiones de carbono procedentes de la energía consumida (Electricity maps, 2023)

En el mapa 6 se observan las emisiones de CO<sub>2</sub> en tiempo real procedentes de la energía consumida por los diferentes países, el mapa también muestra mediante flechas el flujo de electricidad entre los diferentes países.

Las emisiones de Francia son muy bajas porque su consumo eléctrico proviene de fuentes de energías con bajas emisiones de gases de efecto invernadero como la energía nuclear.

Las energías renovables en ocasiones no son capaces de abastecer la demanda de electricidad y deben emplearse otras tecnologías para compensar la diferencia en la demanda, muchos países emplean los combustibles fósiles para apoyar a las renovables y esto aumenta las emisiones. La energía nuclear puede constituir una energía base para ayudar a las renovables con una huella de carbono semejante a estas.

## 4.2. Consumo de recursos naturales

Tanto la construcción como el funcionamiento de una central nuclear requieren la utilización de diversos recursos naturales. Este capítulo se enfoca en el elemento más usado e importante en el campo de la energía nuclear, el uranio.

El uranio es el combustible empleado en la gran mayoría de los reactores nucleares, se emplea en forma de pastillas de óxido de uranio ( $UO_2$ ), las cuales contienen una alta concentración de energía. Generalmente, no se utiliza uranio natural, sino sus óxidos.

El uranio fue descubierto en 1789 por el físico alemán Martin Heinrich Klaproth, recibió su nombre en honor al planeta Urano, que había sido localizado en el firmamento ocho años antes

El uranio existe en la tierra proviene principalmente de supernovas. Durante el proceso de fusión nuclear en las estrellas, el hidrógeno se convierte en helio, y a medida que el hidrógeno se agota, se producen nuevas fusiones que generan elementos más pesados (nucleosíntesis) incluyendo el uranio. Cuando una estrella agota su combustible nuclear y llega al final de su ciclo de vida, puede colapsar y explotar en una supernova. Estas explosiones dispersan los elementos producidos en la fisión por el cosmos, donde pueden formar parte de futuras generaciones de estrellas y sistemas planetarios.

A medida que se forman nuevas estrellas y planetas a partir de estas nubes interestelares enriquecidas con elementos pesados, el uranio puede incorporarse a la composición de los planetas, como en el caso de la Tierra. El uranio se encuentra principalmente en la corteza terrestre, principalmente en forma de minerales como la uranita o la pechblenda. También se encuentra disuelto en rocas, tierra, océanos, plantas y animales, que lo absorben de manera natural.

El uranio es un elemento químico metálico de color gris perteneciente al grupo de los actínidos. Su símbolo químico es el U y su número atómico es el 92. Tiene una vida media de 704 millones de años y es el elemento con el mayor peso atómico que se encuentra en la naturaleza. Por lo general, no se utiliza uranio puro como combustible, sino sus óxidos. En la naturaleza, se presenta como una mezcla de tres isótopos: un 0,02% de U-234, un 0,7% de U-235 y un 99,28% de U-238. En su estado natural, no es muy radiactivo. Dado que se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre, el ser humano ha encontrado utilidad en el uranio principalmente como combustible en los reactores nucleares.

Para utilizar el uranio como combustible, es necesario someterlo a una serie de procesos físicos y químicos, entre ellos el enriquecimiento, que consiste en aumentar la proporción del isótopo U-235, el cual es ideal para la fisión nuclear. Durante este proceso industrial, el porcentaje de U-235 aumenta desde un 0,7% hasta un máximo del 5%.

Los recursos de uranio no se conocen exactamente, pero se clasifican según su viabilidad económica para su extracción. Aunque el uranio es relativamente abundante en la Tierra, no es rentable extraerlo de todas las fuentes. La disponibilidad de este elemento es crucial para la industria nuclear y la generación de energía sostenible a largo plazo.

Según el Libro Rojo del Uranio publicado por la Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en 2020, se estima que hay alrededor de 8.070.400 toneladas de uranio en la Tierra, considerando solo las fuentes cuya extracción es económicamente viable. Existe uranio suficiente para abastecer el parque nuclear actual durante los próximos 120. Estos datos reflejan la situación hasta el 1 de febrero de 2019, y se estima que las reservas podrían haber disminuido en estos años. Es importante tener en cuenta que las reservas de uranio pueden variar con el tiempo a medida que se descubran nuevos recursos .

Las reservas de uranio se clasifican en diferentes categorías en función de su grado de certeza y su viabilidad económica para su extracción. Las categorías más importantes son las reservas conocidas, las reservas probables y las reservas posibles. Además de las reservas conocidas, existen recursos adicionales de uranio que aún no se han clasificado como reservas debido a limitaciones técnicas o económicas en su extracción.

Los yacimientos de mineral de uranio se encuentran en todo el mundo. Las mayores reservas de uranio se encuentran en Australia con un 31%, Kazajistán con un 12%, Canadá con un 9% y Rusia con un 9% de las reservas totales.

### Reservas de uranio en el mundo

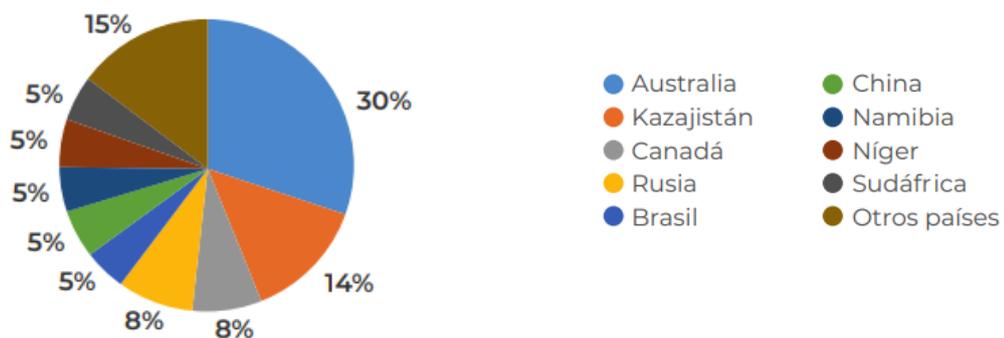


Figura 32. Reservas del uranio en el mundo (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)

Actualmente se extraen más de 50,000 toneladas de uranio anualmente, sin embargo, el parque nuclear mundial, que consta de aproximadamente 400 GW, requiere alrededor de 68,000 toneladas de uranio cada año (Energy Encyclopedia, 2023). A pesar del aumento en la demanda debido a la construcción de nuevos reactores, se ha logrado compensar mediante una mayor eficiencia en el uso del combustible, gracias al reprocesamiento del combustible irradiado y al reciclaje del uranio proveniente de armas nucleares. Desde 1987 Estados Unidos y Rusia han estado empleando armamento nuclear como combustible para sus reactores. Las bombas atómicas contienen un 90% del isótopo U-235 y puede ser reciclado para emplearse en centrales nucleares.

Los depósitos de fosfatos son rocas que contienen millones de toneladas de uranio, y pueden ser extraídos como subproducto de la fabricación de fertilizantes. Esta técnica se empleó en la década de 1990, pero debido a su alto costo, fue abandonada. Sin embargo, en la actualidad, se ha vuelto a considerar como un proceso interesante para obtener uranio.

Las tierras raras, un conjunto de 17 elementos químicos, son de gran importancia en muchas tecnologías actuales. Una cantidad significativa de uranio se encuentra en los depósitos de tierras raras y puede ser extraído como subproducto.

Otra opción es la extracción de uranio del agua de los océanos. Se estima que hay alrededor de 4,000 millones de toneladas de uranio disueltas en los océanos, lo cual podría abastecer a las centrales nucleares durante aproximadamente 100,000 años. Si se logra desarrollar una tecnología eficiente y rentable para extraer uranio del agua de los océanos, esta fuente de energía podría considerarse renovable. La concentración de uranio en el agua está influenciada por reacciones químicas en un equilibrio entre el agua y las rocas del manto terrestre, se estima que las rocas contienen alrededor de 100 billones de toneladas de uranio. Cada vez que se extrae uranio del agua, se lixivia el uranio de las rocas y se disuelve en el agua, remplazando el uranio extraído y volviendo al equilibrio. El precio de extraer el uranio de los océanos sigue siendo elevado y hay varios países como Estados Unidos y China que están trabajando para abaratar el costo de extracción (García Fernández, 2020).

## 5.4.a Transformación del uranio en combustible nuclear y su gestión

El ciclo de vida del combustible nuclear abarca diferentes etapas, desde la extracción del mineral de uranio hasta la deposición del combustible usado en almacenes geológicos profundos (AGP).

Debido a que el uranio natural contiene solo un 0,7% del isótopo adecuado para fisurar U-235, debe enriquecerse antes de fabricar los pellets de combustible. Los métodos más utilizados para enriquecer el uranio son la difusión gaseosa y el enriquecimiento mediante centrifugación.

El combustible nuclear permanece dentro del reactor aproximadamente cuatro años. El combustible usado se almacena temporalmente o se somete a reprocesamiento antes de ser almacenado de forma definitiva en un AGP, este procedimiento se explica en el capítulo siguiente.

En algunos países se recicla o reprocesa el combustible usado para obtener un mayor rendimiento, en los países que no se recicla solo se aprovecha el 5% de la energía del uranio (World Nuclear Association, 2023).

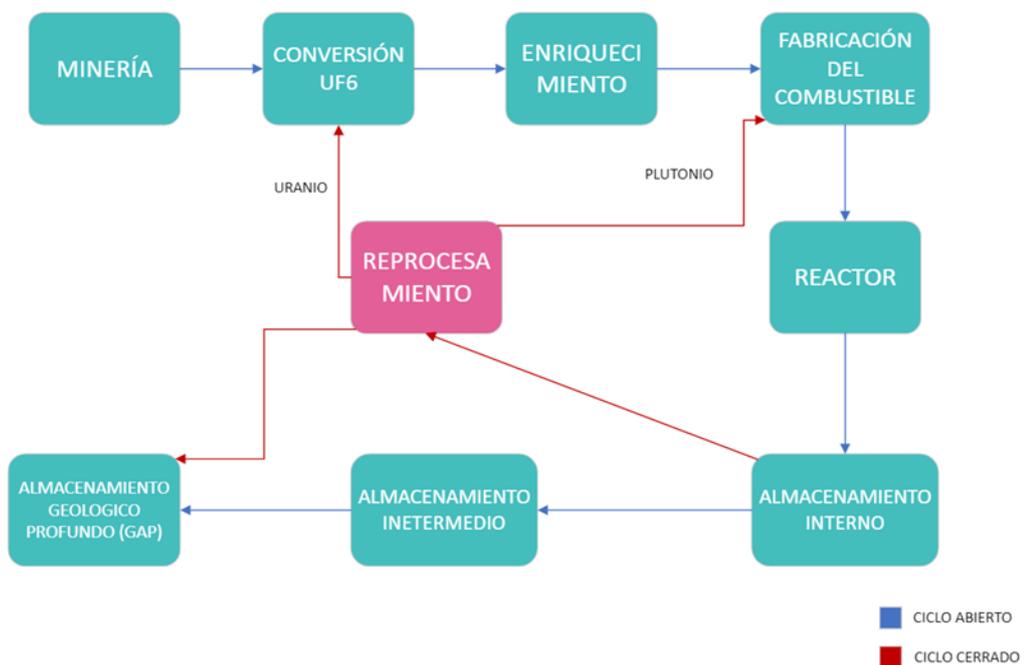


Figura 33. Ciclo de vida del combustible nuclear.

En la Figura 33 se muestra el ciclo completo del combustible nuclear, durante estas etapas se procura reducir al mínimo los efectos adversos para el medio ambiente y la sociedad.

El ciclo de combustible nuclear abarca todas las operaciones necesarias para la producción del combustible nuclear, el funcionamiento del reactor para producir energía eléctrica, el reciclado del combustible irradiado y el almacenamiento del combustible usado en un almacén geológico profundo.

Podemos dividir el ciclo de vida del combustible nuclear en dos, la primera consta de su transformación en combustible y la segunda de su uso y posterior gestión.

La primera parte del ciclo de vida del uranio es la transformación del mineral en combustible nuclear. Las etapas de la transformación del uranio en combustible son las siguientes:

**Etapas 1. Minería o explotación.** Los minerales que contienen uranio se extraen mediante minería a cielo abierto o subterránea. Las minas subterráneas son menos perjudiciales para el medio ambiente, sin embargo, deben estar bien ventiladas para evitar la acumulación de radón (Anexo 2). El uranio natural no es muy radiactivo por lo que es fácil de extraer y de transportar.

El uranio se encuentra en proporciones muy pequeñas en los minerales que lo contiene. Estos minerales se procesan para obtener el concentrado de uranio ( $U_3O_8$ ) conocido como yellow cake debido a su color amarillo. Este concentrado no es muy radiactivo.

**Etapas 2. Primera conversión.** En esta conversión el concentrado de uranio sólido ( $U_3O_8$ ) se transforma en hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ) gaseoso, para poder llevar a cabo el enriquecimiento.

**Etapas 3. Enriquecimiento.** El enriquecimiento es un proceso industrial durante el cual se aumenta la concentración del isótopo fisionable U-235 desde el 0,7% hasta el 5% como máximo. El porcentaje del isótopo fisionable depende del reactor. Este proceso se realiza por difusión o por centrifugación. Sólo ocho países en el mundo están autorizados para producir uranio enriquecido a nivel comercial, estos son Estados Unidos, Rusia, China, Holanda, el Reino Unido, Alemania, Francia, Brasil y Japón.

El enriquecimiento por difusión gaseosa consiste en pasar el  $UF_6$  a través de una membrana semipermeable el isótopo U-235 más ligero atravesará la membrana con mayor facilidad por ser más ligero, produciéndose una separación entre las moléculas del isótopo U-235 y U-238. Es necesaria la realización de unos 1.400 ciclos para obtener un  $UF_6$  enriquecido al 3-4%. Esta técnica de enriquecimiento fue desarrollada durante el proyecto Manhattan.

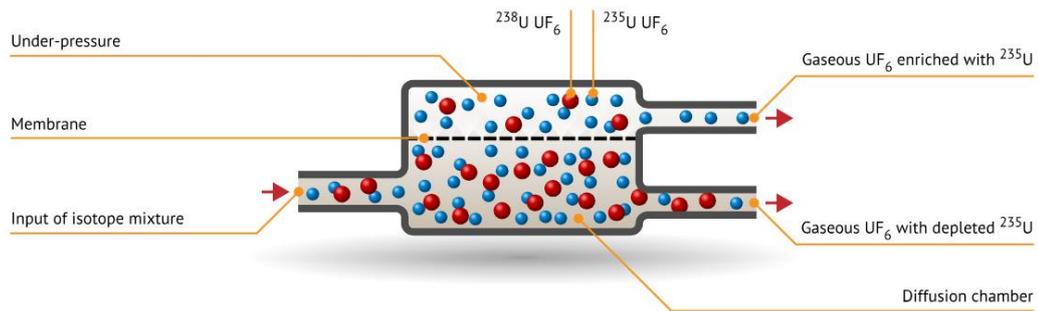


Figura 34. Difusión gaseosa del hexafluoruro de uranio (Energy Encyclopedia, 2023)

En la Figura 34 se presenta el esquema de la difusión del hexafluoruro de uranio para obtener un porcentaje de enriquecimiento inferior al 5%.

El enriquecimiento por centrifugado consiste en inyectar el  $\text{UF}_6$  gaseoso en una centrifugadora, la cual girar a una velocidad de 70.000 rpm, las moléculas del U-238 son expulsadas hacia la pared por la fuerza centrífuga al ser más pesadas. El fondo de la centrifugadora se calienta y el gas enriquecido sale por la parte superior. Este proceso requiere entre 10 y 20 ciclos para alcanzar el nivel de enriquecimiento deseado. Esta técnica fue desarrollada durante la Guerra Fría. En la Figura 35 se muestra un esquema de este proceso.

El enriquecimiento por centrifugado es más eficiente que el realizado por difusión, necesita menor energía para conseguir la separación de los isotopos. En los próximos años la difusión gaseosa será sustituida por el centrifugado.

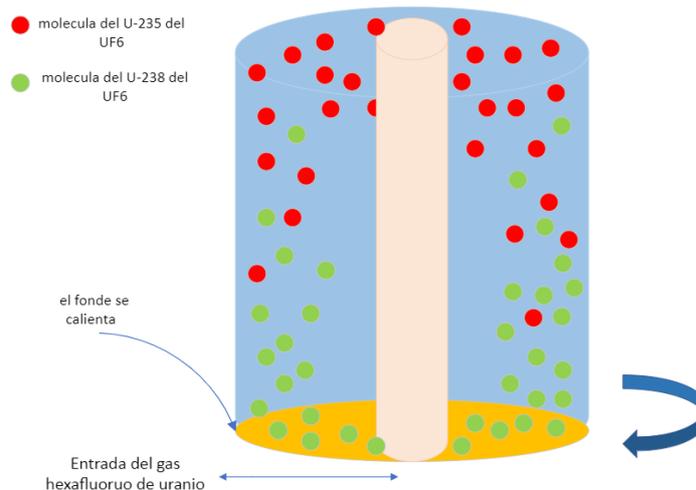


Figura 35. Centrifugación gaseosa del hexafluoruro de uranio

**Etapa 4. Segunda conversión.** Se realiza una segunda conversión para pasar el uranio del estado gaseoso ( $UF_6$ ) al estado sólido, en forma de polvo de dióxido de uranio ( $UO_2$ ).

**Etapa 5. Fabricación.** Mediante prensado y sintetizado del polvo de  $UO_2$  se obtienen unas pastillas cilíndricas (pellets) de 8mm de diámetro y 10 mm. Estas pastillas se introducen en unas barras de zircalloy (aleación especial de zirconio) de 4 metros de longitud. Las barras son la primera barrera de seguridad, albergan las pastillas de combustible y almacenarán en su interior los productos de fisión resultantes durante la producción de electricidad.

Estas barras se agrupan formando el elemento combustible. La separación entre las barras es necesaria para permitir el paso del refrigerante. La composición y el porcentaje del isótopo U-235 de los pellets de combustible depende del tipo de reactor para el cual están destinados. En la Figura 36 se muestran los pasos de la fabricación de los elementos combustibles.

El transporte de los elementos combustibles se realiza mediante la utilización de contenedores especialmente diseñados, con el propósito de cumplir con rigurosos estándares de seguridad en todo momento. Estos contenedores son sometidos a diversas pruebas con el fin de garantizar su capacidad para resistir condiciones extremas, con especial énfasis en prevenir cualquier eventualidad que pudiera causar daños ambientales.

En España la empresa ENUSA Industrias Avanzadas S.A. se dedica a la fabricación de los elementos combustibles para las centrales nucleares españolas y extranjeras.

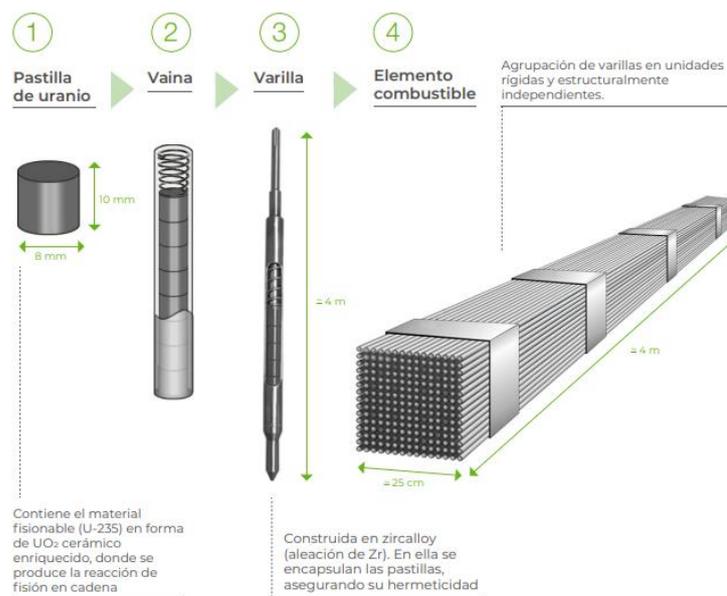


Figura 36. Etapas de la fabricación de los elementos combustibles (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)

La segunda parte del ciclo del combustible alberga todas las operaciones relacionadas con el uso del combustible hasta su posterior gestión y almacenamiento definitivo.

Una central nuclear de 1.000 MW de potencia instalada contiene en su reactor unos 150 elementos combustibles. Como ya he explicado cada 12-24 meses dependiendo del diseño se realizan las paradas de recarga donde se sustituye un tercio del combustible usado. A medida que se van produciendo las reacciones de fisión el combustible pierde efectividad debido a que el material fisiónable se reduce y aumentan los elementos resultantes de dicha fisión.

El combustible usado o irradiado se retira del reactor después de tres ciclos de operación, durante esos 4 años que el combustible pasa en el reactor solo se ha utilizado el 5% de la energía contenida en el uranio. Tras el ciclo de operación conserva el 95% del U-235, un 1% de plutonio, productos radiactivos de vida larga y corta además de los productos de fisión.

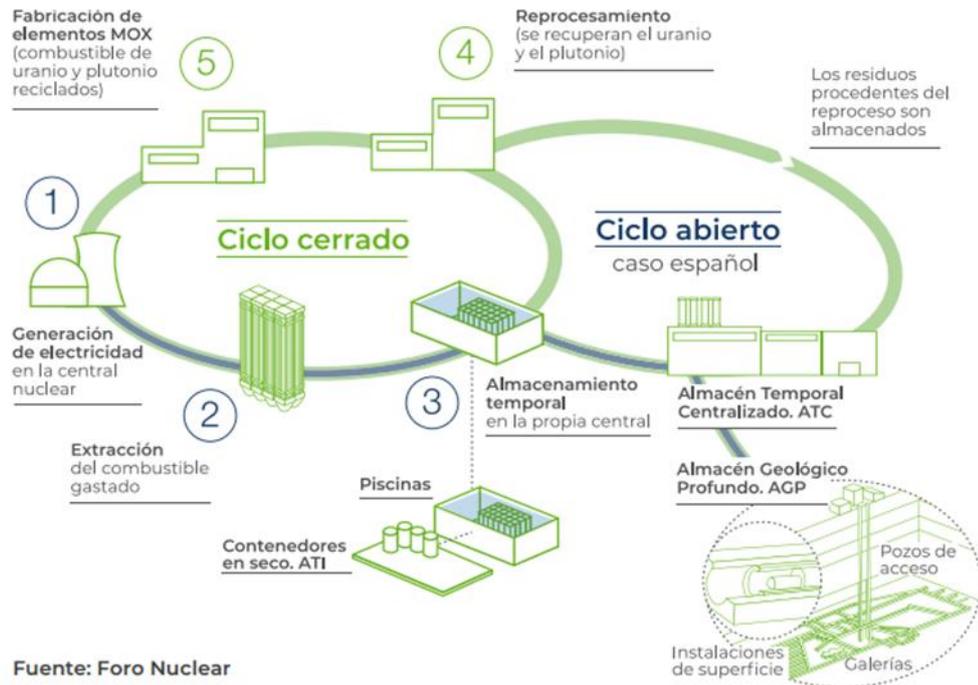
El ciclo abierto consiste en el almacenamiento del combustible en almacenes geológicos profundos una vez ha terminada el ciclo de operación. El combustible irradiado es gestionado como un residuo de alta actividad como se explica en el siguiente capítulo.

El ciclo cerrado consiste en aprovechar la energía del combustible usado y reprocesarlo. El combustible reprocesado o reciclado se conoce como MOX, es una mezcla de óxidos de uranio natural, uranio reprocesado y óxido de plutonio, constituye en 5% del combustible utilizado actualmente.

En 1980 el combustible MOX se comenzó a emplear como combustible comercial. En Europa alrededor de 40 reactores tienen licencia para usar este combustible, en Europa solo MELOX en Francia produce este combustible de forma comercial. La reutilización del combustible irradiado aprovecha todos los materiales fisiónables y reduce el volumen de los residuos de alta actividad.

Durante el reprocesado se separa el U-235 y el Pu-239 generado de los productos de la fisión. Los productos de fisión son tratados como residuos de alta actividad. Estos elementos fisiónables pueden reutilizarse para generar electricidad (Foro de la Industria Nuclear Española, 2013).

En la Figura 37 se muestra el ciclo abierto y el cerrado del combustible nuclear.



Fuente: Foro Nuclear

Figura 37. Esquema de la segunda parte del ciclo de vida del combustible nuclear (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023)

El reprocesamiento del combustible se lleva a cabo en plantas situadas en Francia, China, India, Rusia y Reino Unido.

El combustible REMIX es una forma innovadora de combustible nuclear que se obtiene a partir del uranio y plutonio reciclados. Una de las características destacadas de este combustible es su capacidad para ser reciclado múltiples veces, lo que implica que un reactor podría utilizar el mismo combustible durante un período de hasta 60 años. Este enfoque de reciclaje permite maximizar el aprovechamiento de los materiales nucleares y reducir la generación de residuos radiactivos. Además, el proceso de reciclaje del combustible REMIX contribuye a la minimización del impacto ambiental y promueve la sostenibilidad en la producción de energía nuclear.

El combustible usado puede ser considerado como residuo o un recurso energético. El combustible usado es un producto del que extraemos solo un poco un 5% de su capacidad de generar energía por ello no debería considerarse un residuo. Otra ventaja del reciclado del combustible es reducir el volumen del material que gestiona como residuos de alta actividad, los reactores de cuarta generación aprovechan de forma más eficiente el combustible y serían capaces de utilizar el combustible usado almacenado como combustible.

## 5.4.b El torio

Los reactores nucleares actuales utilizan principalmente el uranio enriquecido o el MOX como combustible pero también podrían utilizar torio. Este puede ser empleado en reactores rápidos para generar U-233 que es fisible y muy similar al U-238.

Durante medio siglo, la tecnología del torio ha estado en fase experimental y se ha considerado como un posible sustituto del uranio como combustible nuclear. El torio es entre tres y cuatro veces más abundante en la Tierra que el uranio y se encuentra en la naturaleza en una única forma isotópica: el Th-232, que tiene una descomposición muy lenta. Su vida media es de 14 000 millones de años, lo que lo convierte en un isótopo poco radiactivo.

El torio fue descubierto en 1828 por el químico sueco Jöns Jakob Berzelius, su nombre hace honor Thor, dios nórdico del trueno. En 1898 Gerhard Schmidt y Maria Skłodowska-Curie descubrieron de forma independiente y casi simultánea el torio era radiactivo. Este descubrimiento se atribuye al químico alemán.

La fuente más común de torio es el mineral monacita, que contiene aproximadamente un 12% de fosfato de torio. Las reservas mundiales de este mineral alcanzan las 16.000.000 de toneladas y se encuentra principalmente en la India. La extracción de torio es menos agresiva para el medio ambiente que la del uranio y este se encuentra en concentraciones más altas que el uranio.

El óxido de torio ThO<sub>2</sub> tiene uno de los puntos de fusión más altos entre los óxidos, alrededor de 3350°C. Además, presenta varias ventajas en comparación con el óxido de uranio UO<sub>2</sub>, es relativamente inerte y no se oxida, posee mayor conductividad térmica, menor expansión térmica y la liberación de gases de fisión es mucho menor. Además, el torio tiene una menor capacidad de proliferación nuclear en comparación con otros materiales fisionables, lo que lo hace más seguro en términos de proliferación nuclear.

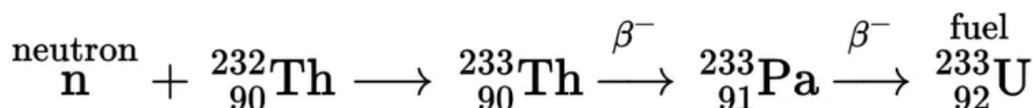


Figura 38. Desintegración del Torio en combustible nuclear (García Fernández, 2022)

En la Figura 38 se muestra la transformación del torio en combustible nuclear. El torio, a diferencia del uranio, no es un material fisionable y no puede ser directamente utilizado como combustible en un reactor convencional. Sin embargo, es un material fértil, ya que al absorber un neutrón y liberar dos electrones, experimenta una transmutación y se convierte en uranio-233, el cual es altamente fisionable. De manera similar al uranio-235 o el plutonio-239 utilizados en los reactores convencionales, el uranio-233 es capaz de generar energía mediante reacciones nucleares de fisión. La transmutación es un reacción nuclear por la que un elemento o isotopo se transforma en otro, mediante decaimiento radiactivo o mediante bombardeo de neutrones (World Nuclear Association, 2020).

Para mantener una reacción en cadena y asegurar el suministro de neutrones excedentes necesarios para la transmutación del torio, este combustible requiere la presencia de otro elemento fisionable adicional.

Como ya he explicado en el capítulo 2.4, los reactores más comunes son los PWR y BWR, una vez que el torio ha experimentado la transmutación y se ha convertido en uranio-233, podría ser utilizado en estos tipos de reactores. Ya se han realizado algunas pruebas parciales donde se han insertado algunos elementos combustibles con torio y han dado buenos resultados. Además, los reactores de agua pesada (PHWR) son especialmente adecuados para el uso de torio, al igual que los reactores de cuarta generación.

Del torio es más abundante y no necesita ser enriquecido, genera menos residuos y proporciona mayor seguridad. A diferencia del uranio natural, todo el torio extraído es potencialmente utilizable en un reactor. Debido a su alto punto de fisión, el torio es considerado más seguro que el uranio. Si bien es un elemento radiactivo, su estabilidad implica que la dosis de radiación producida es muy baja.

Los residuos radiactivos generados por el torio en una central nuclear serían radiactivos durante unos 200 años a diferencia de los 10.000 años de los residuos producidos por el uranio. Por último, la producción de energía eléctrica sería mayor que la producida por el uranio al poder aprovechar toda la energía del combustible y no tener que invertir en enriquecer este combustible.

Aunque la tecnología de reactores de torio aún se encuentra en desarrollo, se enfrenta desafíos técnicos y regulatorios para su implementación a gran escala. El uso de combustibles de torio requiere la realización de diversas pruebas, análisis y obtención de licencias antes de que puedan entrar en servicio. Este proceso es costoso y requiere inversiones significativas. Dado que el uranio es abundante y relativamente económico, no ha habido incentivos significativos para desarrollar nuevos combustibles nucleares. Además, existen desafíos asociados con el ciclo de combustible del torio, como el costo de

fabricación del combustible y el reprocesamiento necesario para obtener plutonio fisionable para la generación de neutrones. Algunos de estos problemas podrían solucionarse con el uso de reactores de sales fundidas de cuarta generación. Es importante mencionar que China ha autorizado recientemente la operación de su primer reactor de sales fundidas de torio (El Economista, 20233).

## 4.3. Los residuos nucleares

Los residuos radiactivos son aquellos residuos que incluyen algún material radiactivo o se encuentran contaminados radiactivamente. El principal inconveniente de la energía nuclear es la producción y gestión de los residuos resultantes de la fisión, además de la gestión del desmantelamiento de las centrales nucleares una vez que ha finalizado su ciclo de vida útil.

Los residuos radiactivos son potencialmente peligros cuya gestión está estandarizada y es muy rigurosa con el objetivo de proteger a la población y al medioambiente de la radiación ionizante. La energía nuclear no es la única tecnología energética que produce residuos peligrosos, todas las tecnologías producen algún residuos peligrosos a lo largo de su ciclo de vida (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023).

### 4.3.a Clasificación de los residuos radiactivos

Todos los isótopos radiactivos acaban decayendo y convirtiéndose en elementos no radiactivos para alcanzar la estabilidad. El decaimiento radiactivo es exponencial por ello los más radiactivos son los que más rápido se descomponen.

Los residuos radiactivos se suelen clasificar en tres grupos en función de su actividad inicial y su período de semidesintegración (García Fernández, 2020):

- Residuos de muy baja actividad (RBBA)
- Residuos de baja y media actividad (RBMA)
- Residuos de alta actividad (RAA)

Para poder tratar correctamente los residuos es esencial identificarlos y clasificarlos correctamente.

Los RBBA provienen principalmente del desmantelamiento de las centrales nucleares y dejan de ser radiactivos en menos de 5 años. Los RBMA suelen ser materiales empleados en la industria nuclear como herramientas o ropa de trabajo. Los radioisótopos de estos residuos tienen un periodo de semidesintegración menor de 30 años. Por último, los RAA contienen elevadas concentraciones de radioisótopos de periodos de semidesintegración superiores a los 30 años, en algunos casos miles de años, estos residuos están formados principalmente por los elementos combustibles.

Mediante la transmutación los actínidos del combustible nuclear pueden llegar a transformarse en productos de fisión de larga vida y los productos de fisión

de larga vida en isótopos radiactivos de vida más corta para tener residuo inocuos de cientos de años en lugar de miles (García Fernández, 2020).

### 4.3.b Las paradas de recarga

Los residuos procedentes de la generación de electricidad se producen a lo largo de todo el ciclo del combustible. Durante la minería, la fabricación del combustible, las operaciones nucleares se producen diversos residuos radiactivos que deben gestionarse correctamente.

El principal residuo de las centrales es el combustible usado, aunque este también puede considerarse como un recurso explicado en el capítulo 4.2. En las centrales nucleares es necesario realizar paradas de recarga de combustible cada 12, 18 o 24 meses en función del diseño del reactor, durante estas paradas se realizan diversos trabajos de mantenimiento y modifican de diseño principalmente para incrementar la seguridad, durante este periodo se duplica la plantilla de empleados de la planta. La forma de repostar de cada central nuclear depende del tipo de reactor.

Estas paradas suelen tener una duración aproximada de 30 días. Para este proceso se subcontrata personal para poder realizar todas las tareas de revisión y mantenimiento. El objetivo de esta recarga es sustituir parte del combustible en el reactor.

En cada parada solo un tercio del combustible es sustituido para maximizar el aprovechamiento del combustible nuclear. Los elementos combustibles usados extraídos del reactor se almacenan en la piscina de combustible, de esos elementos dos tercios se volverán a introducir en el reactor para terminar de consumirse una vez finalice la parada. De esta forma cada elemento combustible permanece tres ciclos de 18 meses en el reactor, unos 4 años y medio.

Una semana antes de la parada por recarga se reciben los elementos combustibles nuevos que se transportan en contenedores especiales con las adecuadas medidas de seguridad para evitar cualquier vertido al exterior. Estos contenedores llegan a la central nuclear transportados por carretera.

En estas paradas se aprovecha para realizar trabajos de mantenimiento, inspecciones y pruebas que no se pueden realizar con el reactor en funcionamiento, así como modificaciones en el diseño para mejorar la seguridad y el rendimiento de la planta. Cada central cuenta con un equipo exclusivo para la planificación de las recargas, durante su ejecución se involucra a toda la organización.

Para poder parar el reactor PWR son necesarias unas 12 horas, partiendo del 100% de potencia nuclear y eléctrica se realiza una parada ordenada, se van introduciendo progresivamente las barras de control y aumentando la concentración de ácido bórico en el agua del circuito primario. Conforme se va reduciendo la cantidad de neutrones se reduce la potencia del reactor. Cuando la potencia baja al 15% se realiza la transferencia de la alimentación eléctrica de los equipos al exterior. En torno al 5% se desacopla el generador de la red y comienza oficialmente la recarga. Una vez que el reactor se encuentra subcrítico, no es capaz de mantener una reacción en cadena, comienza el enfriamiento y la despresurización del circuito primario hasta alcanzar la presión atmosférica y una temperatura inferior a los 60°C. para asegurar que el reactor durante los procesos de carga y descarga no alcance las condiciones de criticidad la concentración de ácido bórico en el agua debe ser elevada.

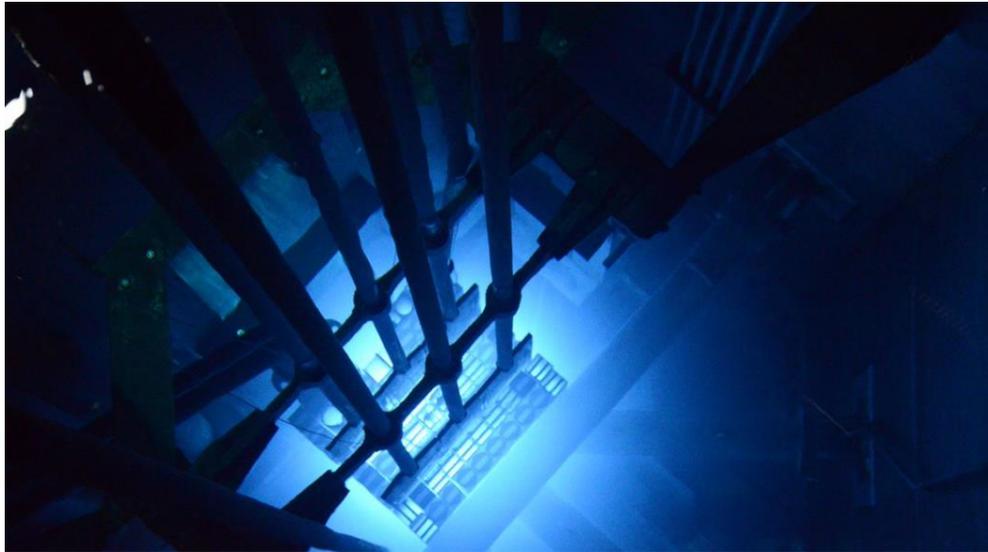
Una vez el combustible nuclear ha pasado en el reactor una media de 4 años en el reactor permanece en la piscina de enfriamiento dentro de la propia central nuclear durante 5 años como mínimo para su enfriamiento y decaimiento nuclear.

Este combustible debe ser almacenado para poder eliminar su calor residual debido a la desintegración radiactiva, hay que blindar su radiactividad para poder trabajar con seguridad en su proximidad y refrigerarlo para evitar una reacción de fisión en cadena. El agua cumple con estas funciones ya que es transparente y permite a los operarios vigilar el combustible a la vez que es una buena barrera natural frente a la radiación además de enfriar el combustible.

Las piscinas de almacenamiento de combustible usado están construidas de hormigón armado con doble revestimiento de acero inoxidable para prevenir fugas. Dependiendo del tipo de reactor la piscina se puede localizar en el mismo edificio de contención o en un edificio anexo. El agua de la piscina es de alta pureza (desmineralizada), y cuenta con un método de aporte de agua normal y hasta cinco más en caso de emergencia. Si se pierde la refrigeración el agua comenzaría a hervir pasadas pocas horas.

La piscina suele medir 12 metros de profundidad, suelen ser de hormigón armado con un doble revestimiento interno de acero inoxidable. Los elementos de combustible tienen una altura de 4 metros quedando así 8 metros de blindaje. Esta agua suele estar a unos 25-35 grados. El sistema está formado por dos circuitos independientes cada uno con una bomba de calor y un intercambiador de calor. Cada bomba puede ser alimentada por los generadores diésel de emergencias. Además, las piscinas cuentan con detectores de fugas, sistemas de purificación del agua, sistemas de refrigeración e instrumentación de temperatura y nivel. Se realizan análisis periódicos de la actividad y diversos parámetros químicos que pueden afectar a los elementos combustibles almacenados.

En la Figura 39 se muestra la radiación o el efecto de Cherenkov, la radiación se manifiesta como un resplandor de color azul que se genera cuando las partículas que conforman los átomos superan la velocidad de la luz en ciertos medios como es el agua. Este fenómeno se puede observar en las piscinas de combustible usado.



*Figura 39. El efecto de Cherenkov. Fuente: Foro Nuclear*

En nuestra sociedad está muy arraigada la creencia de que el color de la radiación es verde fluorescente, o que el propio combustible tiene ese color, esto se debe en gran parte a las referencias cinematográficas de la energía nuclear. El combustible usado dentro del agua de las piscinas de refrigeración emite una luz azul hipnotizante y muy bonita.

Tras estos 5 años el combustible irradiado pierde parte de su radiactividad y es trasladado hacia un almacén intermedio. Finalmente, estos residuos son trasladados a un almacén intermedio y posteriormente se deposita en un almacén geológico profundo.

### 4.3.c Almacenamiento de los residuos nucleares con seguridad

La gestión del combustible irradiado puede realizarse mediante el ciclo abierto y el ciclo cerrado explicados en el capítulo 4.2. Los residuos radiactivos pasan por procesos de tratamiento para modificar alguna de sus características consiguiendo que su gestión sea más segura o económica. En España la gestión de los residuos nucleares se realiza mediante el Real Decreto

102/2014 recogido en el Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR) (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023).

La Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (Enresa) es la encargada de gestionar los residuos en España, es pública pero la gestión de los residuos es financiada por las empresas que los generan según el Plan General de Residuos Radiactivos de 2006.

Los residuos de baja actividad y media son almacenados en almacenes de forma definitiva en almacenes intermedios temporales y los residuos de alta actividad terminarán en los almacenes geológicos profundos después de su almacenamiento intermedio.

#### **Almacén temporal individualizado (ATI)**

En estos almacenes se utilizan para almacenar el combustible usado una vez que ha sido enfriado, se almacenan en contenedores para almacenar los residuos en seco, en una atmosfera inherente de helio. Los contenedores mantienen la subcriticidad del combustible, confinan los materiales radiactivos, evacuan el calor residual protegiendo a la población y el medioambiente. Estos contenedores están diseñados para soportar unas condiciones ambientales extremas y para que el combustible pueda ser almacenado de esta manera debe cumplir con una serie de requisitos como un grado de quemado máximo o un enriquecimiento inicial dado.

Estos contenedores pueden ser instalados a la intemperie o en una instalación, los almacenes temporales son capaces de funcionar con seguridad entre 60 y 100 años.

#### **Almacén temporal centralizado (ATC)**

Un ATC es una instalación cuya función es mantener almacenado con seguridad el combustible nuclear usado hasta su deposición en su localización definitiva.

En España está diseñado para albergar unas 6700 toneladas de elementos combustibles usados como otros residuos de media actividad durante unos setenta años. La refrigeración del combustible se realiza por circulación de aire sin alimentación eléctrica por seguridad.

#### **Almacén geológico profundo (AGP)**

El AGP es considerado internacionalmente como la opción más segura y viable para el almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos de alta actividad. Consiste en el almacenamiento de los residuos en formaciones geológicas estables, a una gran profundidad bajo tierra, donde la combinación de barreras naturales y artificiales proporcionan un aislamiento seguro a largo plazo, evitando de esta forma que las generaciones futuras se vean obligadas a gestionar los residuos nucleares que generamos hoy en día.

Para el emplazamiento de estos almacenes se deben realizar estudios sobre la idoneidad del terreno, teniendo en cuenta factores como la estabilidad geológica, la ausencia de actividades sísmicas, la baja permeabilidad del terreno entre otros.

Una vez seleccionado el lugar, se construyen pozos y túneles en la roca para acceder a las zonas de almacenamiento. Los residuos radiactivos se empaquetan en cápsulas construidas a partir de materiales nobles y cerámicos, se colocan en cámaras de almacenamiento dentro de los túneles. Se utilizan múltiples barreras para prevenir la liberación de radiación al entorno. Pasados los 10.000 años la mayor parte de la radiactividad residual habrá desaparecido. El diseño de los GAP se realiza minimizando la posibilidad de liberación de radiación para garantizar la protección de las generaciones futuras. Las barreras naturales y tecnológicas garantizan que los residuos no puedan escapar al exterior bajo cualquier circunstancia.

El depósito se sella para satisfacer los requisitos, pero debe ser revisable o recuperable, una vez sellado no necesita supervisión ni genera gastos de gestión. El objetivo primordial de la gestión de los residuos es la protección de las personas y del medio ambiente.

## 4.4. Seguridad nuclear y el riesgo de accidentes

Las centrales nucleares son consideradas unas de las instalaciones más seguras del mundo tanto a nivel tecnológico como físico. La seguridad está presente en todos los procesos para garantizar la protección de las personas y el medio ambiente en todas las situaciones posibles. Los operadores de las centrales, los organismos y autoridades independientes supervisan la seguridad de estas instalaciones en todo momento a lo largo de su ciclo de vida.

Tanto la energía nuclear como el resto de las tecnologías energéticas implica ciertos riesgos. Las consecuencias de un accidente nuclear pueden llegar a ser muy perjudiciales y se trabaja constantemente en reducir la posibilidad de que pueda ocurrir un accidente. El objetivo primordial de la seguridad nuclear es reducir al mínimo las posibilidades de que se pueda producirse un accidente y si este llega a ocurrir, mitigar sus consecuencias.

Para lograrlo se analizan y cuantifican todos los escenarios posibles que puedan afectar a la seguridad de una central nuclear. Se estudian las causas internas que pueden afectar a la instalación, estos se definen como accidentes base de diseño. Estos análisis permiten determinar las medidas necesarias para prevenir estos accidentes y establecer respuestas adecuadas en caso de que pueda fallar la prevención.

La seguridad nuclear se basa en varios pilares fundamentales. En primer lugar, se busca mantener la reacción de fisión controlada y estable. Además, es importante evacuar el calor generado por la reacción de fisión tanto en condiciones normales como anómalas. También se enfatiza en la contención de las sustancias radiactivas para evitar daños a la población y al medio ambiente.

Todo complejo industrial o invento tecnológico creado por el hombre son susceptibles de sufrir fallos y accidentes. Las plantas térmicas nucleares acumulada mucha experiencia, pero pueden ocurrir fallos relacionados con el diseño, elementos mecánicos, eléctricos o errores humanos. En las centrales nucleares se incorporan tres niveles de protección (Consejo de Seguridad Nuclear, 2023):

1. Múltiples barreras de protección para evitar las emisiones de material radiactivo.
2. Protección de las barreras mediante las salvaguardias tecnológicas.

### 3. Procedimientos y protocolos para poder operar los equipos en caso de que fallen las barreras.

La seguridad es el principal enfoque en todas las etapas de la industria nuclear. Desde el diseño y la construcción hasta la operación, el desmantelamiento y cierre, se prioriza la seguridad.

En el ámbito de la industria nuclear, la seguridad se aborda a un nivel más profundo que en otros sectores industriales para poder asegurar la operación segura de las instalaciones nucleares en todas las circunstancias posibles. Para lograrlo, se consideran dos parámetros fundamentales: el diseño y el emplazamiento.

En cuanto al diseño, las plantas nucleares son concebidas y diseñadas para cumplir las funciones de seguridad en todo momento independientemente de las circunstancias. El diseño debe asegurar la disposición de todos los elementos y dispositivos necesarios para poder realizar la explotación de forma segura y eficaz reduciendo al mínimo la probabilidad de accidentes, asegurando que sus consecuencias en caso de ocurrir puedan mitigarse de manera segura.

En cuanto al emplazamiento, se evalúan diversos factores relacionados con la seguridad para minimizar el riesgo derivado de eventos externos, ya sean de origen natural o humano. Esto incluye fenómenos como terremotos, inundaciones u otras amenazas que podrían afectar de forma negativa a la central nuclear, también se evalúa la viabilidad de los planes de emergencia en el emplazamiento seleccionado.

Los sistemas de seguridad de una central nuclear se dividen en dos grupos, sistemas de seguridad activos y pasivos.

Los sistemas de seguridad activos tienen como objetivo asegurar el funcionamiento normal de la central nuclear. Están formados por detectores térmicos, control informático, bombas hidráulicas, alarmas acústicas y luminosas entre otros.

Los sistemas pasivos evitan la fuga de material radiactivo en caso de un accidente. Los materiales radiactivos se encuentran confinados mediante múltiples barreras, son barreras consecutivas o multibarrera, para prevenir la liberación incontrolada de materiales radiactivos al entorno, si una falla actúa la siguiente y así sucesivamente. Primero las varillas de combustible retienen las pastillas de dióxido de uranio y los productos de la fisión resultantes en su interior, estas se sitúan en el interior de las vasijas del reactor que contendrá estos elementos en caso de fugarse de las varillas. Por último, el edificio de contención aloja el reactor y proporciona protección contra daños externos y, al mismo tiempo, evita la liberación de radioactividad en caso de que ocurra un accidente grave dentro del reactor. Este edificio es un bloque de hormigón

armado diseñado a prueba no sólo de fugas radiactivas sino, literalmente, a prueba de bombas (Lozano Leyva, 2009).

La liberación al exterior del combustible irradiado y de los flujos del circuito primario de refrigeración puede ser catástrofe. Uno de los efectos más graves es que una parte de esos elementos radiactivos termine ingerida o inhalada por la población, teniendo un efecto muy negativo en la salud dependiendo de la dosis (Anexo 2).

Los reactores deben mantenerse en unos rangos de temperatura en función de su diseño. La principal medida de seguridad de las centrales nucleares es asegurar el sistema de refrigeración del reactor en todo momento, si se pierde la refrigeración se puede fundir el combustible dentro de la vasija. Por ello las plantas nucleares cuentan con diversas medidas para poder refrigerar los reactores en todo momento como son los generadores diésel de emergencia. Cuando la planta pierde el suministro eléctrico exterior estos generadores alimentan las bombas del refrigerante. Los reactores de cuarta generación incorporan sistemas de refrigeración que no requieren de un suministro eléctrico para poder funcionar, esta es una media adicional en la seguridad. Los sistemas de refrigeración de emergencia no son iguales para todos los diseños, aunque pueden llegar a ser muy similares. Una de las principales diferencias entre la segunda y tercera generación de reactores es la implementación y mejora de los sistemas de seguridad, los diseños nuevos aparecen para compensar las carencias de los modelos anteriores.

Cuando una central térmica de combustibles fósiles tiene un problema grave de refrigeración, se corta el suministro del combustible o del aire y se detiene la combustión sin mayores consecuencias. En las centrales nucleares la reacción en cadena no se puede detener de forma casi instantánea. Los productos resultantes de la fisión continúan desintegrándose cada uno a su ritmo generando calor en el proceso. Si el reactor pierde la refrigeración, empezará a aumentar la temperatura del núcleo pudiendo llegar a fundirse. La mayoría de los productos de fisión tienen una vida de semidesintegración muy corta y al cabo de aproximadamente una hora el calor liberado por la desintegración empieza a disminuir. Por ello asegurar la refrigeración del núcleo es tan importante.

La seguridad nuclear está regulada a nivel internacional a través de la Convención sobre Seguridad Nuclear del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Esta convención revisa y evalúa los programas nucleares de cada país. Existen mecanismos y programas de cooperación internacional para prevenir accidentes nucleares y fomentar el intercambio de experiencias operativas, como el *Institute of Nuclear Power Operations* (INPO) y la *World Association of Nuclear Operators* (WANO).

Para reducir la posibilidad de producirse un accidente el OIEA ayuda a los Estados Miembro a aplicar las normas internacionales de seguridad para refuerzan la seguridad de las centrales nucleares. Todos los países tienen un organismo regulador que vela por la seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas, vigila los niveles de radioactividad y controla la dosis de radiación ionizante que reciben los trabajadores y el impacto radiológico en las personas y el medio ambiente. Estas autoridades vigilan que la dosis de radiación recibida sean lo más bajo posible, protegiendo la salud de las personas.

En España ese organismo es el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), son los encargados de garantizar la seguridad nuclear y la protección radiológica de las personas y el medio ambiente. El CSN otorga licencias a las personas responsables de la operación de instalaciones nucleares, evalúa su impacto en el medio ambiente y establece límites y condiciones para su funcionamiento, asegurando que no supongan un impacto radiológico inaceptable para las personas o el medio ambiente (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023).

La dosis de radiación ionizante que recibe la población a causa de radiaciones artificiales es mucho más pequeña que la recibida de forma natural (Anexo 2).

Las plantas nucleares se someten de forma voluntaria y periódica a auditorías realizadas por expertos para evaluar y mejorar su seguridad.

En la Figura 40 se observa la escala internacional de sucesos nucleares y radiológicos que refleja la gravedad de los accidentes relacionados con la tecnología nuclear. Los tres primeros niveles se clasifican como incidentes y desde el 4 hasta el 7 son considerados accidentes.



Figura 40. Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES) (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023).

A lo largo de la historia de esta tecnología, desde la construcción de las primeras centrales nucleares en la década de 1950, han ocurrido varios accidentes e incidentes, los más recordados son a su vez los más graves, *Chernobyl*, *Fukushima* y *The Three Mile Island*. Voy a describir estos accidentes en profundidad para entender cuáles fueron sus causas y consecuencias.

**The Three Mile Island:** accidente clasificado como nivel 5, este accidente ocurrió en 1979. La central de *The Three Mile Island* está situada en Pensilvania, EE. UU. En el momento del accidente contaban con dos reactores de agua a presión PWR. El accidente comenzó a las 4 de la madrugada del 28 de marzo de 1979. Un fallo de la bomba de alimentación del circuito secundario causó una parada automática de la turbina y posteriormente del reactor. En ese momento se produjo el arranque automático de las bombas de alimentación auxiliares encargadas de llevar agua hacia los generadores de vapor que refrigeran el reactor. Por error, las válvulas de aislamiento se encontraban cerradas. Como consecuencia los generadores de vapor se secaron y produjeron la falta de refrigeración en el reactor provocando la parada del reactor por la presión tan elevada en su interior.

La temperatura y presión del circuito primario comenzaron a aumentar, para reducir la presión se abrieron las válvulas de alivio. Cuando se alcanzaron los niveles de presión adecuados una de las válvulas no se cerró correctamente y la instrumentación de la sala de control no indicaron ninguna anomalía. Los operadores no tenían ningún motivo para pensar que la válvula había quedado abierta y que el agua de refrigeración se estaba perdiendo por la válvula. Otros instrumentos disponibles también proporcionaban información inadecuada o confusa a los operadores.

La pérdida de presión dentro del reactor derivó en la puesta en marcha de forma automática de la inyección de seguridad, esta consiste en introducir agua a mucha presión para compensar la pérdida. El agua entraba en el reactor para refrigerarlo, pero salía por la válvula de alivio. Los instrumentos de medida indicaban a los operadores que el nivel del presionador estaba lleno, por ello decidieron finalizar con la inyección de seguridad temiendo que aumentase demasiado la presión. Como consecuencia de estos fallos y errores el núcleo del reactor quedó parcialmente descubierto, aumentando su temperatura hasta fundirse prácticamente la mitad del núcleo. Por falta de instrumentación que mostrase los niveles de agua dentro del reactor los operadores no podían saber que el reactor estaba parcialmente descubierto.

Durante la mañana los operadores consiguieron cerrar una válvula anterior a la válvula de alivio que estaba abierta, consiguiendo detener la fuga de agua consiguiendo reanudar la inyección de seguridad y el núcleo quedó refrigerado durante la tarde del mismo día del accidente.

Una reacción química a alta temperatura entre el agua y los tubos de zircaloy produjo una importante cantidad de hidrógeno. Para eliminarlo los operadores estuvieron abriendo periódicamente una válvula de venteo del circuito primario. El 27 de abril los operadores establecieron la circulación de agua por convección natural, en ese momento la central se encontraba en parada fría, el agua se encontraba a menos de 100 °C y a presión atmosférica.

La tapa del reactor se retiró en julio de 1984 permitiendo el acceso a los restos del núcleo, la investigación reveló que se produjo la fusión parcial del núcleo, gracias a la integridad del edificio de contención se evitó la dispersión de la contaminación.

Este accidente tuvo importantes consecuencias en la industria nuclear y en la percepción pública de la energía nuclear en Estados Unidos. Se intensificaron las regulaciones, los estándares de seguridad nuclear y se reforzaron los procedimientos de gestión de emergencias. Además, el accidente contribuyó a un aumento de la oposición a la expansión de la energía nuclear en el país. Este accidente causó preocupación entre los habitantes próximos a la central nuclear. El Departamento de Salud de Pensilvania mantuvo durante 18 años un registro de todos los habitantes dentro de un radio de 8 km de la central para determinar las consecuencias o los efectos del accidente. El programa se suspendió en 1997 sin ninguna evidencia de efectos inusuales en la población más próxima a la central.

La Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos también llevó a cabo estudios sobre las consecuencias radiológicas del accidente, se estima que aproximadamente 2 millones de personas en el área recibieron una dosis de radiación promedia de 1 mSv por encima de la dosis de fondo radiactivo habitual, una dosis que no supone ningún riesgo para la salud. No se pudo determinar ningún efecto sobre la salud de la población que pudiera estar relacionado con el accidente. El único efecto detectable fue el estrés psicológico sufrido por los habitantes más próximos a una central nuclear.

Las tareas de desmantelamiento y desconexión del reactor duraron casi 12 años y costaron aproximadamente 1.000 millones de dólares.

Doce días antes del accidente se estrenó la película de ficción *El Síndrome de China*, interpretada por Jane Fonda y Michael Douglas. Narra la historia de dos reporteros que se encuentran por casualidad en una central nuclear cuando ocurre un accidente y los dirigentes de la central hacen todo lo posible por ocultarlo. El título de la película hace referencia a la creencia que se tenía sobre los accidentes nucleares, se creía que si un reactor estadounidense llegaba a fundirse atravesaría verticalmente la tierra hasta llegar a China. La película fue un éxito debido a al accidente, muchas personas llegaron a pensar que la película narraba la historia real del accidente, desconociendo que el accidente fue posterior. Esta película hizo creer al público que los dirigentes de la central

nuclear estaban ocultando información sobre el accidente y generó cierta histeria en las áreas más cercanas al lugar del accidente.

El accidente de *The Three Mile Island* fue debido a una combinación de errores de alineamiento de los equipos, instrumentación que ofrecía datos falsos y la falta de formación de los operadores ante accidentes. También se produjeron errores de comunicación a la opinión pública que causaron temores injustificados puesto que la dosis de radiación emitida fue muy baja y no supuso ningún riesgo para la población (World Nuclear Association, 2022).

**Chernobyl:** clasificado como accidente de nivel 7, ocurrió el 26 de abril de 1986. Durante la madrugada se inició una prueba en la unidad número cuatro de la central nuclear Vladímir Ilich Lenin. Esta prueba poseía el objetivo de comprobar la capacidad de enfriar el núcleo del reactor en caso de la pérdida del suministro exterior, alimentando las bobas de refrigeración con la energía residual de las turbinas una vez que el vapor dejará de alimentarlas durante el tiempo que tardan en ponerse en funcionamiento los motores diésel.

La central nuclear poseía un reactor RBMK, reactor de gran potencia de tipo canal, moderado por grafito y refrigerado por agua en ebullición, el cual utilizaba como combustible uranio enriquecido al 2% del U-235. Este reactor fue diseñado para la fabricación de plutonio para las bombas atómicas, la producción de energía eléctrica era su uso secundario. En el momento del accidente el reactor solo se empleaba para la producción de electricidad ya que la Unión Soviética poseía métodos más eficientes para la fabricación de armamento (Lozano Leyva, 2009).

Este diseño de reactor se considera intrínsecamente inseguro debido a que un aumento de la potencia significaba un aumento de temperatura y este a su vez provocaba de nuevo un aumento de la potencia. Esto hacía que el reactor fuese más complejo de operar en comparación a los reactores actuales.

Para la prueba era necesario reducir la potencia térmica hasta los 700 y 1000 MW, al comenzar la bajada de potencia hasta los niveles deseados, esta fue interrumpida por el administrador de la red eléctrica debido a la elevada demanda de energía eléctrica, obligando a detener la maniobra durante unas 9 horas. Durante este tiempo la concentración de xenón aumentó por encima de los niveles previstos. Este fenómeno se conoce como envenenamiento por xenón, este gas es producto de la fisión del uranio y su principal característica es su capacidad de absorción de neutrones resultantes de la fisión reduciendo la potencia del reactor como consecuencia.

Una vez obtenido el permiso de la administración para reanudar la prueba, la potencia disminuyó de forma inesperada hasta los 30 MW térmicos, muy por debajo de los niveles previstos. Después de unas horas se consiguió estabilizar el reactor a una potencia de 200 MW. Estos cambios en la potencia

aumentaron la concentración del xenón, para evitar la parada del reactor por la absorción de neutrones se tomó la decisión de extraer las barras de control superando los límites permitidos.

La prueba requería de la anulación de los equipos de emergencia para observar la capacidad de refrigeración, la situación era compleja desde el punto de vista de la operación y fueron los operarios del turno de noche, con menor formación y experiencia, los encargados de gestionar esta prueba.

De las ocho bombas de recirculación del refrigerante solo cuatro estaban en marcha, al cerrarse las válvulas de la última turbina en marcha que seguía en funcionamiento, estas bombas alimentadas con la electricidad residual de la turbina no fueron capaces de refrigerar el núcleo del reactor. Los equipos de emergencias al estar apagados no pudieron ponerse en marcha de forma automática. El reactor se encontraba fuera de control, la temperatura del refrigerante aumentó y este comenzó a hervir. El aumento de temperatura provocó un aumento de la potencia, este proceso se realimentaba causando que la potencia aumentase de forma descontrolada, llegando a unos 30.000 MW térmicos, diez veces la potencia nominal del reactor.

La temperatura del núcleo provocó que el refrigerante se evaporara produciendo una gran explosión química de vapor que dañó la envoltura del reactor. Los operarios procedieron a la parada manual del reactor, las barras de control no se insertaron correctamente debido a la deformación existente en el núcleo. Por motivos económicos la parte inicial de las barras de control era de grafito, un excelente moderador, provocando de nuevo un aumento de potencia.

El daño en la envoltura del reactor permitió la entrada de oxígeno que en contacto con el grafito a altas temperaturas provocó un incendio.

El edificio donde se encontraba el reactor era uno industrial sin capacidad de contención real ante un accidente. El personal que atendió la emergencia carecía de preparación y equipo de protección individual. El plan de emergencia existente desde 1964 no se aplicó y los dirigentes de la antigua Unión Soviética intentaron ocultar inicialmente el accidente y retrasando la evacuación.

Suecia fue el primer país en detectar la radiación proveniente del desastre de *Chernobyl*. El 28 de abril de 1986, dos días después de la explosión en la planta nuclear, los sistemas de detección de radiación en Suecia registraron niveles anormalmente altos de radiactividad en el aire. También dos operarios de una central nuclear sueca detectaron partículas de radiación en su ropa. Esas partículas indicaban una fuga de material radiactivo, pero era imposible que fuesen de su central nuclear ya que midieron de forma exhaustiva la radiactividad en su interior. Analizando las partículas llegaron a la conclusión de que tenía que haber ocurrido una fuga en otra parte. En un principio, la fuente exacta de la radiación no se conocía, pero las investigaciones

posteriores confirmaron que provenía de la planta nuclear de *Chernobyl* (Lozano Leyva, 2009).

La Unión Soviética recibió ayuda internacional y del OIEA para gestionar los residuos causados por el accidente y limitar el impacto de la radiación en el medioambiente. Tras el accidente se establecieron protocolos y marcos internacionales para los accidentes nucleares y el intercambio de información, además se de prestar ayuda internacional en el caso de que lo necesite. El OIEA ha trabajado estrechamente con el UNSCEAR y otros asociados internacionales para evaluar de forma independiente el impacto de la radiación en la salud y el medio ambiente desde el accidente.

Las consecuencias del accidente nuclear de *Chernobyl* derivaron en la emisión de radiación ionizantes al exterior debido a la ausencia de un edificio de contención. Esta radiación fue producida esencialmente por el yodo-131 y el cesio-137, el yodo-137 tiene un vida media de 8 días y puede ser inhalado o ingerido a través del agua o alimentos contaminados especialmente la leche y los vegetales. En el cuerpo humano el yodo se deposita en la glándula tiroidea, para evitar la acumulación del yodo radiactivo es necesario saturar esta glándula con yodo no radiactivo ingerido en forma de pastillas los días posteriores al accidente. El cesio-137 tiene una vida media de 30 años y su riesgo sobre la salud depende de la dosis recibida. Se priorizó el reparto de estas pastillas de yodo en niños y adolescentes tanto en la Unión Soviética como en sus países vecinos. Se han realizado varios estudios para poder evaluar las consecuencias de accidente en la salud de la población y el medioambiente. Desde 1995 en Bielorrusia se ha detectado un aumento en la incidencia en el cáncer de tiroides en niños. Las posibilidades de desarrollar cáncer de tiroides aumentan con la exposición al yodo radiactivo, pero sigue sin haber pruebas que demuestren que la radiación emitida de *Chernobyl* ha producido este aumento en la incidencia del cáncer. No existen pruebas concluyentes para poder asegurar que la radiación de *Chernobyl* haya tenido consecuencias negativas en la población (Cardis, Howe, Ron, & Bebeskko, 2006).

**Fukushima:** clasificado como accidente de nivel 7, este accidente tuvo lugar el 11 de marzo de 2011. Fueron varios los factores que derivaron en el accidente de *Fukushima*, primero se produjo un terremoto de magnitud 9 y posteriormente un tsunami.

La central nuclear fue capaz de soportar el terremoto, los reactores de la central entraron en régimen de parada para poder controlar la fisión nuclear. Las líneas eléctricas colapsaron, pero la central respondió según el diseño y los protocolos y no causo mayor problema.

Pero el terremoto desencadeno un tsunami, la muralla anti-sunami construida para proteger la central no pudo hacer frente al tsunami por ser demasiado

baja para impedir la entrada del agua del mar en la central. Esta entrada de agua supuso la destrucción de algunas estructuras y la pérdida de varios de los generadores diésel de emergencias y por tanto la capacidad de poder refrigerar los tres reactores de la central. Sin poder refrigerar el reactor, el combustible nuclear se sobrecalentó llegando a fundirse

Después de varias explosiones de hidrógeno durante los días 12, 14 y 15 de marzo cantidades importantes de materiales radiactivos se emitieron al exterior.

Hasta la fecha no se ha podido demostrar o atribuir ninguna muerte a las emisiones de radiactividad durante el accidente, tampoco se espera un incremento en la incidencia de cáncer en el futuro.

Un informe de la OMS en mayo de 2012 estimó que la dosis de radiación recibida por la población próxima a la central nuclear era entre 1 y 10 mSv durante el primer año tras el accidente, una dosis de radiación muy insignificante. Dos zonas concretas indicaban valores de radiación más elevados entre 20 y 50 mSv, una cantidad elevada, pero es a partir de los 100 mSv/ año se considera que la radiación es peligrosa. UNSCEAR también ha realizado varios informes sobre los efectos de la radiación emitida y no se ha demostrado que esta tenga un efecto en la salud de las personas próximas al área del accidente. La única consecuencia grave del accidente fue el miedo y estrés generado en la población (García Fernández, 2020).

Tras el accidente todas las centrales del mundo introdujeron mejoras y reforzaron su seguridad ante sucesos que no pertenezcan a la categoría de accidentes de diseño (Organismo Internacional de la Energía Atómica, 2023).

Estas medidas no solo sirven para aprender de los errores sino también para dotar a las centrales nucleares de herramientas flexibles para hacer frente a accidentes no previstos en el diseño.

El accidente causó víctimas mortales, pero no fueron a causa de la radiación sino de la evacuación innecesaria de la población próxima a la central nuclear. La mayoría eran personas mayores y sufrieron mucho estrés durante el proceso de evacuación.

Los accidentes de *Chernobyl* y *Fukushima* fueron los más graves no sólo por la radiación emitida al exterior sino porque muchos profesionales recibieron dosis de radiación ionizante más elevadas de lo habitual por tener que realizar trabajos para mitigar las consecuencias de estos accidentes. Ambos causaron mucho estrés y preocupación en la población.

Tras los accidentes e incidentes ocurridos a lo largo de la historia de la industria nuclear, esta ha adquirido conocimientos y experiencia operativa, gracias a los cuales la industria nuclear se ha convertido en una de las más seguras,

transparentes y con intercambio de información entre las diferentes centrales nucleares.

Las centrales nucleares no compiten entre sí, se busca que todas las centrales nucleares funcionen con seguridad y para ello es esencial transmitir la experiencia adquirida entre las diferentes centrales. Tras los accidentes se han llevado a cabo investigaciones para determinar sus causas y aprender de los errores, introduciendo posteriormente mejoras en el diseño, la formación de los operadores, procedimientos, protocolos de seguridad y la creación de organismos internacionales como la WANO para evitar que se repitan los mismos errores.

## 4.5. Impacto en la sociedad y biodiversidad

La energía nuclear, al igual que todas las formas de generación de energía, conlleva la producción de residuos en diferentes etapas de su ciclo de vida. Además, requiere de la minería para obtener los materiales necesarios y puede generar residuos durante la construcción, operación y desmantelamiento de las instalaciones. Estos residuos pueden ser tanto reactivos como tóxicos.

La energía nuclear como toda actividad humana tiene un impacto negativo en la biodiversidad debido a las obras y actividades asociadas a la puesta en marcha de una central nuclear. En España la protección radiológica está regulada por el Consejo de Seguridad Nuclear, la radiación recibida por la población está limitada a 1 mSv al año para los miembros del público, es decir, aquellos que no están expuestos de forma habitual a la radiación ionizante en su trabajo.

La radiación emitida por central nuclear durante un año es menor a la radiación recibida por un vuelo transatlántico e incluso menor que la radiación proveniente del consumo de un plátano. En el Anexo 2 se explica con más detalle la radiación recibida y sus fuentes.

Es importante señalar que un accidente nuclear podría provocar un desastre medioambiental pero como ya he mencionado en el capítulo anterior, la energía nuclear es muy segura y es improbable que pueda producirse un accidente grave. Las centrales nucleares siguen estrictas normas internacionales de protección radiológica para salvaguardar a los trabajadores, la sociedad y el medio ambiente de la radiación ionizante.

La energía nuclear es una tecnología que ha sido estigmatizada y rodeada de numerosos mitos, lo cual ha generado preocupación y controversia persistente desde sus primeras aplicaciones.

“Nada en la vida debe ser temido, solo entendido. Ahora es el momento de entender más, para temer menos” (Maria Skłodowska-Curie). La energía nuclear tiene un impacto positivo en la sociedad debido a que genera puestos de trabajo y energía a un precio asequible sin emitir gases de efecto invernadero, por otro lado, genera un impacto negativo porque puede crear preocupación y miedo en la sociedad. Es considerada como peligrosa o contaminante, muchos de estos miedos y preocupaciones tienen su origen en el desconocimiento de esta tecnología y en la difusión de información errónea.

La industria audiovisual puede condicionar la imagen de la industria nuclear en los espectadores. Se ha repetido tantas veces una imagen que corresponde

con la realidad de esta tecnología que parte de la sociedad considera como realidad lo que ve en la pantalla. Este es el caso de la barra verde fluorescente de uranio vista tantas veces en películas y series, parte de la sociedad considera que ese es el aspecto real del combustible de las centrales nucleares.

Existen muchas series y películas donde se muestra la industria nuclear, la mayoría de estas están basadas en hechos reales sobre los accidentes nucleares, pero existe una pequeña proporción que no describen hechos reales, sino que son pura ficción mostrando aspectos erróneos sobre esta tecnología.

Es comprensible que exista un miedo irracional hacia la energía nuclear, especialmente debido a los eventos históricos como el lanzamiento de bombas atómicas y la carrera armamentística de la Guerra Fría. Sin embargo, las centrales nucleares siguen estrictas regulaciones y normas internacionales de protección radiológica para garantizar la seguridad de las instalaciones y minimizar los impactos en la salud humana y el medio ambiente.

A continuación, presentaré algunos de los mitos más comunes relacionados con esta forma de generación de energía, con el objetivo de ofrecer una visión más clara sobre la energía nuclear, muchos de ellos han sido divulgados por desconocimiento o de forma malintencionada para desprestigiar a esta tecnología. Es importante derribar los mitos sobre la energía nuclear para que la sociedad pueda decidir con libertad.

MITO: «Una central nuclear puede explotar como una bomba atómica»

Una central nuclear necesita una proporción del 4-5% de isótopo fisionable U-235. Este porcentaje en una bomba atómica es mucho mayor, se necesita un 90% de este isótopo. Es imprescindible tener en cuenta que los procesos de enriquecimiento de uranio están sometidos a estrictos controles y regulaciones internacionales, como el Tratado de No Proliferación Nuclear, para prevenir la proliferación de armas nucleares y garantizar un uso pacífico de la energía nuclear.

MITO: «Las centrales nucleares caducan a los 40 años»

La legislación española no establece un límite máximo en el funcionamiento de las centrales nucleares. La cifra de 40 años se determinó inicialmente como el tiempo necesario para amortizar la inversión no como como el período en el que la planta se consideraría obsoleta o inoperable. Es importante destacar que cada central nuclear es evaluada individualmente en términos de seguridad y viabilidad a medida que se acerca a ese plazo inicialmente establecido. Muchas centrales nucleares siguen operando más allá de los 40 años después de un riguroso análisis técnico y de seguridad, basado en

estándares internacionales y regulaciones específicas para asegurar el funcionamiento seguro y eficiente de la planta .

MITO: «El accidente de Chernobyl se puede producir en cualquier central nuclear»

Un accidente como el de Chernobyl no puede ocurrir en las centrales nucleares actuales, este accidente se cita con frecuencia como argumento en contra de la energía nuclear. Este fue consecuencia de fallos humanos y del diseño del reactor como he explicado en el capítulo anterior. Las centrales nucleares cuentan con muchos sistemas de seguridad tanto activos como pasivos, entre ellos el edificio de contención. Este edificio protege a la población de los elementos radiactivos del reactor en caso de accidente. La central de Chernobyl no contaba con esa medida de seguridad estrictamente necesaria.

MITO: «La energía nuclear produce una gran cantidad de residuos radiactivos»

Si bien es cierto que la generación de residuos radiactivos es inherente a la energía nuclear, también es importante tener en cuenta que estos residuos pueden ser gestionados y almacenados de manera segura. Existen tecnologías y prácticas para el tratamiento, almacenamiento y disposición adecuada de los residuos nucleares, y se continúa investigando para encontrar soluciones más eficientes y sostenibles en el manejo de estos desechos. También se puede proceder al reprocesamiento del combustible nuclear para poder aprovechar de forma eficiente toda la energía contenida en el uranio.

MITO: «Las torres de refrigeración emiten gases tóxicos»

Las torres de refrigeración son objeto de críticas por parte de los activistas antinucleares quienes argumentan que emiten gases nocivos a la atmósfera. Estas estructuras, que pueden alcanzar alturas de aproximadamente 150 metros y tienen forma de hiperboloide de revolución, funcionan como intercambiadores de calor. En el proceso de refrigeración, el agua caliente proveniente del circuito terciario de la instalación ingresa a la torre de refrigeración mientras que el aire más frío circula en su interior. La entrada del agua caliente ocurre a una altura de 10 metros en forma de lluvia, y debido a la diferencia de densidades entre el aire exterior más frío y el aire interior más húmedo, se genera una corriente ascendente de aire frío. Como resultado de este fenómeno, el agua se enfría y desciende hacia el fondo de la torre (García Fernández, 2020).

Es importante destacar que el enfriamiento del agua en las torres de refrigeración se logra mediante el proceso de evaporación. Durante este proceso, el agua se convierte en vapor de agua con microgotas en suspensión, que son emitidas al exterior en forma de nubes.

Las torres de refrigeración no son exclusivas de la energía nuclear, las centrales térmicas que utilizan torres de refrigeración son aquellas que generan electricidad a partir de la energía térmica producida por la combustión de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo o el gas natural. Estas centrales se conocen como centrales termoeléctricas de ciclo de vapor. Las torres de refrigeración son necesarias en este tipo de centrales para enfriar el agua utilizada en el ciclo de generación de energía.

## 4.6. Los objetivos del desarrollo sostenible y las ESG

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son una serie de objetivos fijados por las Naciones Unidas en 2015 con el propósito de abordar los desafíos globales y promover un desarrollo sostenible en todo el mundo. Los ODS constan de 17 objetivos interrelacionados que abarcan aspectos económicos, sociales y ambientales, estos objetivos están diseñados para ser alcanzados para el año 2030 (Naciones Unidas, 2023).

La energía nuclear puede contribuir en la consecución de varios de los objetivos del desarrollo sostenible.

Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.

A lo largo de este documento se han analizado las diferentes características de la energía nuclear. Esta energía se considera sostenible debido a que no emite gases de efecto invernadero durante su ciclo de operación y sus residuos son gestionados de manera segura y apropiada para salvaguardar a las generaciones futuras. Además, la energía nuclear puede proporcionar grandes cantidades de energía de manera prácticamente constante y es considerada una tecnología segura.

El precio de un MWh procedente de la energía nuclear varía entre los diferentes países, en países donde las centrales nucleares son de larga operación el precio de la energía es muy bajo unos 30 dólares el MWh. En países con centrales que todavía no han superado su vida de diseño el precio de esta puede llegar a ser muy elevado, como es el caso de Eslovaquia con un precio de 100 dólares el MWh. Estos precios son muy similares a las energías renovables, la fotovoltaica tiene un precio que puede oscilar entre los 30 y 280 dólares el MWh y la eólica entre los 30 y los 300 dólares el MWh. La energía eléctrica procedente de centrales térmicas nucleares ya amortizadas es muy barata y asequible (International Energy Agency, 2020).

Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos

La electricidad es fundamental para el crecimiento económico, y los países desarrollados tienen una alta demanda de energía eléctrica. Se estima que la demanda de energía irá en aumentando con el paso del tiempo. La energía nuclear puede proporcionar electricidad con bajas emisiones de carbono, lo que contribuye al logro de un crecimiento económico sostenible. Sin energía eléctrica, no puede haber desarrollo ni crecimiento económico.

Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.

Tanto la construcción de infraestructuras, la industrialización y la innovación requieren de energía eléctrica para llevarse a cabo. La energía nuclear puede satisfacer la demanda de energía sin aumentar la degradación del medio ambiente.

Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.

Una de las metas para lograr ciudades más sostenibles es la reducción de los vehículos de combustión interna en las carreteras para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero. A partir de 2035, la venta de vehículos de combustión interna estará prohibida en la Unión Europea, lo que implica que los vehículos eléctricos serán la alternativa a los coches de combustión interna. Con la creciente demanda de energía eléctrica, se están realizando numerosos esfuerzos para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que requiere el uso de tecnologías energéticas con bajas emisiones de carbono, como las energías renovables o la energía nuclear.

Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

Para lograr una producción sostenible, es imprescindible desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente. Para llevar a cabo la producción, se necesita energía eléctrica, y esta debe provenir de fuentes con bajas emisiones de carbono.

Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Para mitigar el cambio climático, es necesario abandonar el uso de combustibles fósiles, que emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera y son las fuentes de energía más contaminantes. Más del 70% de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de la generación de energía, por lo que es importante eliminar del mix de producción las tecnologías más contaminantes.

Estos seis objetivos están directa o indirectamente relacionados con el consumo de energía y la degradación del medio ambiente. La energía nuclear cumple también con criterios ESG (Environmental, Social and Governance), que se utilizan para evaluar el impacto y la sostenibilidad de las prácticas empresariales. La energía nuclear no emite gases de efecto invernadero, genera gran cantidad de energía, es eficiente y segura. Sus residuos se almacenan de manera segura siguiendo protocolos establecidos. Además, es una tecnología controlable por el ser humano, lo que permite aumentar o disminuir su producción según la demanda energética. Incluso el exceso de

energía nuclear puede ser utilizado en la producción de hidrógeno. La energía nuclear se somete a estrictos controles internacionales para cumplir con estándares de calidad y eficiencia. Dado que las centrales nucleares no compiten entre sí, existen mecanismos de cooperación y transparencia. Por esto motivos la energía nuclear tiene un impacto positivo en el medioambiente, la sociedad y la gobernanza de las centrales.



# Capítulo 5.

## Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado un análisis económico y medioambiental de la energía nuclear.

Mediante el análisis económico podemos observar que, aunque la inversión inicial de una central nuclear es elevada esta depende de cada proyecto. Los proyectos pertenecientes a los reactores FOAK, los primeros de su tipo suponen una inversión más elevada, después de adquirir experiencia y construir más centrales del mismo tipo su precio se reduce. Los gastos de operación y mantenimiento también se reducen con el número de reactores en la planta. El LCOE de la energía nuclear es similar al resto de las tecnologías, dependiendo de la ubicación se sitúa entre los 30 y 100 dólares el megavatio hora. Por ello el uso de la energía nuclear es económicamente viable sobre todo la energía proveniente de las centrales nucleares de larga operación, al estar amortizadas su LCOE se reduce de forma muy significativa.

A través del análisis medioambiental se han analizado las emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso de recursos naturales, la gestión de los residuos, la seguridad y el impacto de la energía nuclear.

Las conclusiones extraídas de este análisis económico y medioambiental son las siguientes:

- La inversión inicial en una central nuclear es elevada, y los proyectos pioneros pueden enfrentar dificultades, sobrecostos y retrasos. Sin embargo, a medida que se construyen más centrales y se adquiere experiencia, los costos tienden a disminuir, alcanzando un LCOE comparable al de otras tecnologías energéticas.
- Las centrales nucleares presentan costos de operación, mantenimiento y combustible relativamente bajos.

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas a lo largo del ciclo de vida de la energía nuclear son una de las más bajas entre las diferentes tecnologías energéticas, lo cual contribuye a mitigar el cambio climático.
- La energía nuclear posee una alta densidad energética, lo que le permite generar grandes cantidades de energía utilizando una menor cantidad de combustible en comparación con las centrales térmicas convencionales.
- Las reservas de uranio indican la cantidad económicamente viable de extraer, estimándose que puedan durar alrededor de 120 años. Sin embargo, nuevas reservas podrían descubrirse en el futuro, y la tecnología podría abaratar el costo del uranio proveniente de fuentes que actualmente no resultan rentables. Además, el uranio puede ser reemplazado por el torio, un elemento más abundante.
- Los residuos nucleares son gestionados de manera segura para evitar la liberación de radiación al medio ambiente y proteger a las generaciones futuras.
- Los reactores de cuarta generación están diseñados para ser más seguros, eficientes y reducir la cantidad de residuos nucleares generados. Estos reactores podrían utilizar el combustible usado almacenado en depósitos geológicos profundos como fuente de energía y sus residuos serían de baja actividad.
- Las centrales nucleares deben cumplir con rigurosos estándares de seguridad, y cada incidente relacionado con la energía nuclear ha contribuido a mejorar la seguridad en todas las centrales nucleares a nivel mundial.
- La fusión nuclear tiene el potencial de ser una fuente de energía limpia, segura e inagotable.
- Actualmente, solo se extrae el 5% de la energía almacenada en el uranio, pero con un ciclo de combustible cerrado y el uso de reactores de cuarta generación, este porcentaje podría aumentar hasta el 97%.
- La energía nuclear es una fuente de energía confiable, capaz de generar electricidad de manera prácticamente continua, lo que garantiza un suministro eléctrico estable.
- Los organismos reguladores tienen la responsabilidad de garantizar la seguridad en el sector nuclear y minimizar la exposición a la radiación a niveles mínimos posibles.

Confío en que este trabajo haya cumplido el propósito de divulgar una tecnología muy criticada y muchas veces señalada sin tener en cuenta aspectos técnicos.

# Anexos

## Anexo1. La fisión nuclear

La fisión nuclear es un proceso mediante el cual un núcleo pesado se rompe. Esta ruptura conlleva la emisión de varios neutrones, radiación y energía. Esta energía proviene de la diferencia de masa del núcleo de los átomos y los productos de la fisión según la ecuación de Einstein  $E = mc^2$ .

La forma más eficiente de inducir la fisión es mediante la colisión de un neutrón lento y el núcleo pesado, los núcleos pesado más apropiados para llevar a cabo este proceso de fisión son los isótopos U-235 y el Pu-239.

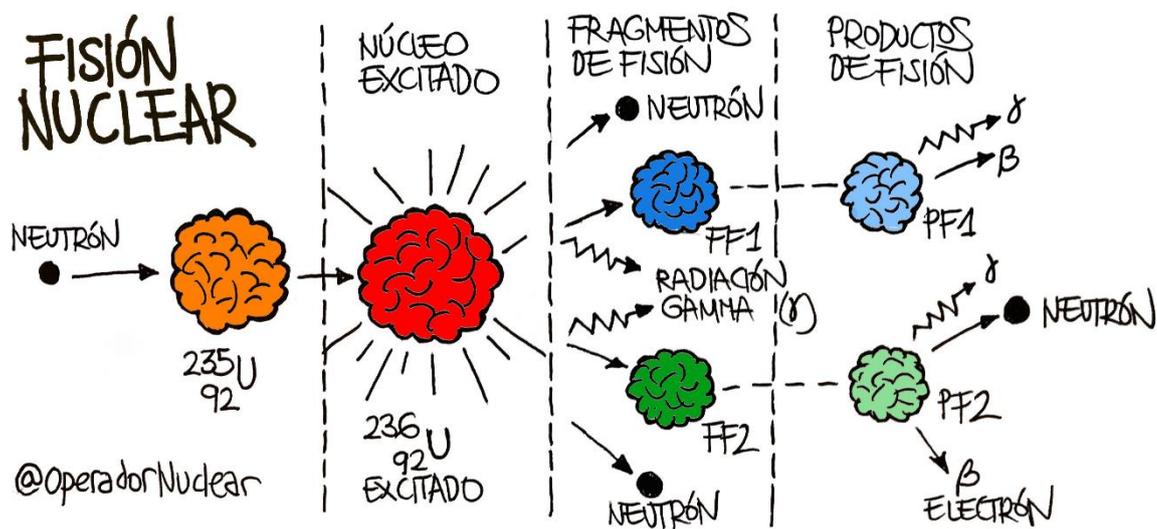


Figura 41. Esquema de la fisión nuclear

En la Figura 41 se muestra el esquema de la fisión de un átomo de U-235.

En cada fisión de átomo de uranio se emiten un par de neutrones, que a su vez impactan con otros núcleos de uranio produciendo nuevas fisiones, produciendo una reacción en cadena.

Para ralentizar los neutros resultantes de la fisión se emplea un moderador, se emplean sustancias que contengan electrones más ligeros como puede ser el hidrogeno o el grafito. Los neutrones producidos durante la fisión poseen una elevada energía cinética y podrían escapar del del núcleo del reactor sin producir nuevas fisiones. Para evitar la fuga de los neutrones es necesario el uso del moderador que mediante colisiones reduce la velocidad de los neutrones para poder colisionar con los núcleos de uranio y fisionar. El moderador más común es el agua. La función del moderador es aumentar el número de fisiones.

El uranio de los reactores nucleares está enriquecido a un 5% como máximo del isotopo U-235, este isotopo fisiona produciendo la reacción en cadena, mientras que el U-238, el más abundante, no es capaz de fisionar, tras varias transformaciones dentro del reactor se transforma en plutonio-239. El Pu-239 es un elemento artificial (Lozano Leyva, 2009).

## Anexo 2. La radioactividad y radiación recibida por la población

La radioactividad es la transformación espontáneo y gradual de un núcleo inestable en otro estable emitiendo radiación nuclear en forma de partículas y ondas electromagnéticas o fotones. La radioactividad decrece con el tiempo de forma inversamente proporcional.

Los materiales radiactivos generan radiación ionizante, la cual es capaz de alterar las propiedades químicas de las moléculas, especialmente las del ADN de las células. Esta alteración del material genético puede producir mutaciones y estas, en ocasiones, pueden producir cáncer u otras enfermedades, es una cuestión de probabilidad. Por ello es muy importante medir la dosis de radiación recibida por parte de la población y reducirla lo máximo que sea posible para prevenir sus efectos. La radiactividad se mide en becquerel en honor al descubridor de la radiactividad, Henri Becquerel. Ese valor representa las desintegraciones del átomo por minuto.

El posible daño causado en el cuerpo humano por la radiación ionizante se mide con las dosis de radiación recibida. El sievert (Sv) es la unidad que mide la dosis de radiación, según el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) la población mundial recibe 2,4 mSv de origen natural es lo que se conoce como fondo radiactivo natural. En España se estima que la dosis recibida por la población es de media de 3,7 mSv en total. Esta radiación no es producida por ninguna

actividad humana, proviene de los rayos cósmicos. A partir de los 100 mSv/año se ha detectado un aumento en la incidencia del cáncer.

La misma dosis de radiación ionizante puede producir distinto daño en los diferentes tejidos y órganos, este depende del tipo de radiación recibida. Cada cuerpo tiene diferentes sensibilidad y la radiación no afecta de la misma forma a todos.

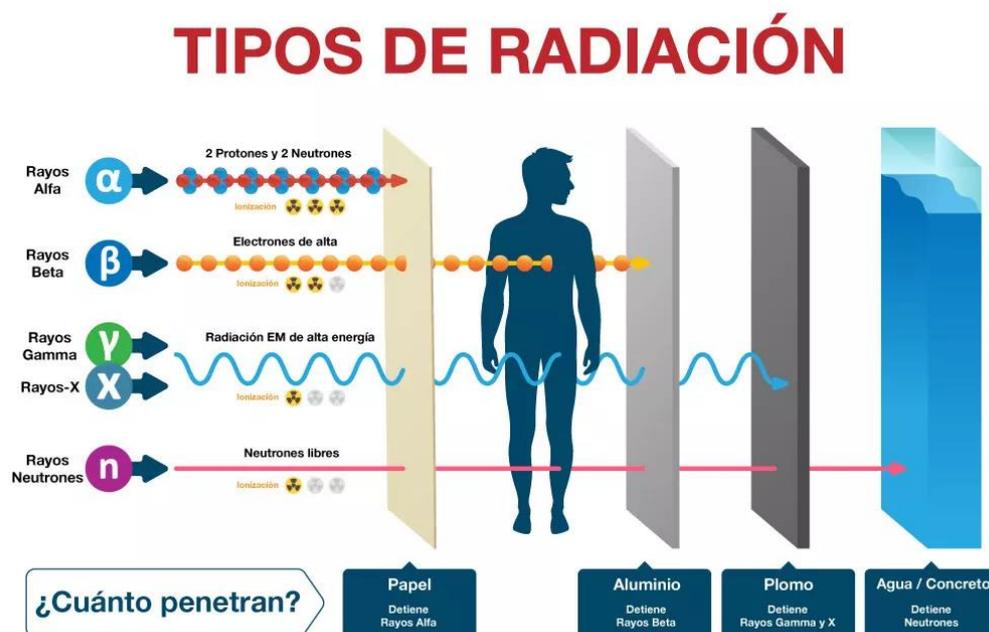


Figura 42. Tipos de radiación

En la Figura 42 podemos observar los diferentes tipos de radiación, alfa, beta, gamma, rayos x y rayos neutrones.

El periodo de semidesintegración de un isótopo radiactivo es el tiempo que tarda en decaer a la mitad el contenido radiactivo como consecuencia del decaimiento radiactivo.

Los radioisótopos o isotopos radiactivos con semividas largas suelen ser emisiones alfa y beta, lo que facilita su manejo. Mientras que los radioisótopos de semividas suelen emitir rayos gamma, más penetrante y peligrosos. Por ello los materiales radiactivos como el uranio o el plutonio suponen un riesgo mucho menor para la salud que los isotopos de periodos de semidesintegración más cortos.

Estamos rodeados de radiactividad. Las dosis a las que nos encontramos expuestos suponen un riesgo muy bajo para nuestra salud.

Cada país cuenta con un organismo regulador que vela por la seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas. Sus funciones son las de proteger a los trabajadores de estas instalaciones controlando la dosis de radiación recibida además de limitar el impacto radiológico en las personas y el medioambiente. En España como ya hemos mencionado a lo largo del documento el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

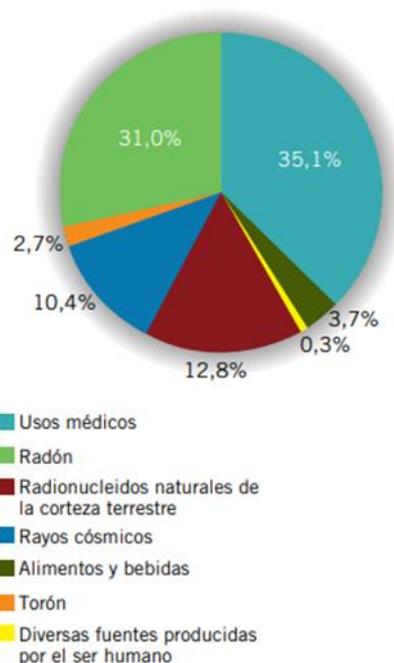


Figura 43. Origen de la radiación recibida (Consejo de Seguridad Nuclear, 2023)

En la Figura 43 se presenta el origen de la radiación recibida por la sociedad española según el informe del CSN.

La radiación que recibimos procede de diversas fuentes (Consejo de Seguridad Nuclear, 2023):

#### **Radiaciones ionizantes naturales.**

Todas las personas están expuestas a la radiación natural y representa la mayor parte de la dosis recibida. Los rayos cósmicos son en su mayor parte protones y partículas alfa de alta energía provenientes del espacio. La mayor parte de estos rayos tiene su origen el Sol o de explosiones de supernovas. La atmósfera nos protege de gran parte de estos rayos cósmicos.

La dosis de radiación ionizante debida a los rayos cósmicos depende de la ubicación geográfica y la altitud, la dosis recibida es mayor en los polos y en

altitudes elevadas. La dosis media en España es de 0,39 mSv al año, pero puede variar entre 0,3 y 1 mSv.

Los edificios frenan parte de la radiación cósmica, pero su componente neutrónica puede atravesar con facilidad los materiales de construcción. Los pasajes que realizan con frecuencia en vuelos transoceánicos reciben una dosis anual más alta que la media debido a su mayor exposición a los rayos cósmicos. Por esta razón los tripulantes de los aviones tienen limadas las horas de vuelo al año.

También recibimos radiación natural procedente del gas radón, el cual se origina a partir de la desintegración del uranio presente de forma natural en la Tierra. Este gas es muy peligroso, cuando es inhalado parte de sus productos de decaimiento se retienen en los pulmones e irradian las células con partículas alfa. El radón es una de las principales causas del cáncer de pulmón. El radón se concentra en el interior de los edificios, depende de características geológicas del suelo, los materiales de construcción de la vivienda, del tipo de vivienda entre otros. La mejor forma de eliminar este gas es ventilar correctamente la vivienda.

Los materiales radiactivos presentes de forma natural en la tierra emiten rayos gamma a los que nos encontramos expuestos. Ciertos materiales utilizados en la construcción, que se extraen de la tierra, también son radiactivos.

Nos encontramos expuestos a radiaciones ionizantes tanto en espacios abiertos como en interiores. La dosis recibida depende del tipo de rocas que forman el suelo y de los materiales utilizados en la construcción de los edificios. En España, la dosis media es de 0,48 mSv por año, pudiendo llegar hasta 0,6 mSv en ciertas áreas, principalmente aquellas con altos niveles de uranio.

### **Alimentos y bebidas.**

El potasio-40 es la fuente más importante de irradiación interna, ya que se encuentra en los alimentos y en el agua potable. La radiación procedente de la dieta representa una dosis media de 0,29 mSv por año, de los cuales 0,17 mSv se deben al potasio-40. Los mariscos concentran mucha radiación y las personas que los consumen con frecuencia reciben dosis de radiación más elevadas.

### **Radiaciones ionizantes artificiales**

La dosis que reciben las personas a causa de la radiación artificial es mucho menor que la recibida de forma natural. Las fuentes médicas de radiación son la mayor fuente de radiación a la que estamos sometidos.

En países desarrollados, la dosis media anual para fines diagnósticos es de alrededor de 1 mSv al año, aunque en casos excepcionales puede llegar a ser de hasta 100 mSv. La dosis recibida puede variar entre diferentes personas

debido a múltiples factores, y también puede diferir en distintas pruebas diagnósticas. Según la UNSCEAR, la dosis media por uso médico para cada individuo en un país con nivel sanitario I, como España, se estima en 1,28 mSv por año.

Una radiografía del pecho proporciona una dosis de 0,02 mSv, la de una pierna son 0,06 mSv y la del abdomen son 0,7 mSv.

La radiactividad liberada como consecuencia de las pruebas nucleares efectuadas hace décadas se ha ido depositando la superficie de la tierra, con el paso del tiempo se ha ido reduciendo hasta de 0,005 mSv al año actuales.

La industria nuclear, los hospitales y los centros de investigación realizan vertidos controlados de materiales radiactivos al medio ambiente, siempre dentro de los límites establecidos. Uno de los objetivos de los organismo reguladores y del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) es reducir la dosis recibida por estos vertidos. La dosis anual promedio para la población es inferior a un 0,001 mSv. Las áreas próximas a centrales nucleares en España están limitadas por debajo de 10 mSv por año.

Las personas reciben dosis de radiación como resultado del uso habitual de productos de consumo, como detectores de humo, relojes luminosos y viajes en avión como ya he comentado anteriormente. La dosis anual promedio atribuida a estas fuentes es de 0,1 mSv, pudiendo llegar a alcanzar hasta 1 mSv en algunos casos.

#### Protección radiológica.

Las personas que se encuentran expuestas de forma habitual a las radiaciones ionizantes por temas laborales se clasifican como trabajadores profesionales expuestos mientras que el resto de las personas son clasificadas como miembros del público. Los límites de dosis don fijadas de acuerdo con las directivas de la Unión Europea y la *Nuclear Regulatory Commission* estadounidense son:

- Para los trabajadores profesionales expuestos el límite legal es de 100 mSv acumulados en 5 años consecutivos con un máximo de 50 mSv al año. Si un trabajador de una central nuclear supera la dosis de radiación establecida se les prohibirá el acceso a las zonas radiológicas.
- Para los miembros del público este límite es de 1mSv al año.

Estos límites no incluyen la radiación recibida de forma natural ni la radiación de las diferentes pruebas médicas (Consejo de Seguridad Nuclear , 2023).

# Bibliografía

- Generation IV International Forum. (2021). *Anual Report*.
- Abram, T., & Ion, S. (2008). Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. *Energy Policy*, *Energy Policy*, 4323-4330.
- Almoguera, R. (2006). Los costes y las ventajas de la energía eléctrica nuclear. *Revista Sociedad Nuclear Española*, 24-26. Retrieved from Revista Sociedad Nuclear Española.
- Asociación Nuclear Ascó Vandellós II A.I.E. (2023). *Esquema de las instalaciones de las centrales nucleares*. Retrieved from <https://www.anav.es/es/anav/esquema/>
- Balsera Yáñez, J. (2022). *Análisis de la inversión en una planta fotovoltaica. Trabajo Fin de Grado*. Universidad de Sevilla.
- Carbon Brief. (2016). *Mapped: The world's nuclear power plants*. Retrieved from <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants/>
- Cardis, E., Howe, G., Ron, E., & Bebeshko, V. (2006). Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years on. *Journal of radiological*, 127-140.
- Centrales térmicas de ciclo combinado. (2023). *¿Cuánto cuesta construir una central de ciclo combinado?* Retrieved from <https://www.cicloscombinados.com/index.php/servicios-renovetec-ctcc/tipos-de-servicios/servicios-de-arbitrajes/cuanto-cuesta-construir-una-central-de-ciclo-combinado>
- CIRE PL. (2023). *Producción de energía eléctrica en Polonia* . Retrieved from <https://www.cire.pl/stroyny/struktura-i-produkcja-energii-elektrycznej-w-polsce>
- Consejo de Seguridad Nuclear . (2023). *Seguridad nuclear*. Retrieved from <https://www.csn.es/seguridad-nuclear>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2023). *Protección radiológica*. Retrieved from <https://www.csn.es/proteccion-radiologica>

- El Economista. (2023). Así es la revolucionaria central nuclear de China que usará torio en lugar de uranio para producir energía. *El Economista*.
- El Orden Mundial. (2023). Retrieved from <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/>
- Electricity maps. (2023). Retrieved from <https://app.electricitymaps.com/map>
- Energía y Sociedad. (2021). *La energía nuclear sufre un exceso de carga fiscal, sin parangón con otros países*. Retrieved from <https://www.energiaysociedad.es/>
- Energy Encyclopedia. (2023). *Nuclear Energy* . Retrieved from <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/nuclear-power>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2010). *¿Qué es la seguridad nuclear?* Retrieved from <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/que-es-la-seguridad-nuclear/>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2013). *Etapas para la obtención del combustible nuclear a partir del uranio*. Retrieved from <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/etapas-para-la-obtencion-del-combustible-nuclear-a-partir-del-uranio/>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2020). *¿Cómo se gestionan los residuos radiactivos?* Retrieved from <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/como-se-gestionan-los-residuos-radiactivos/>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2023). *¿Cómo funciona una central nuclear?* Retrieved from <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/como-funciona-una-central-nuclear/>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2023). *¿Cómo influye la energía nuclear en el medio ambiente?* Retrieved from <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-energia-nuclear-y-medio-ambiente/como-influye-la-energia-nuclear-en-el-medio-ambiente/>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2023). *¿Cuántas reservas de uranio hay en el mundo?* Retrieved from <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-combustible-nuclear/cuantas-reservas-de-uranio-hay-en-el-mundo/>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2023). *Energía nuclear en el mundo*. Retrieved from <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/energia-nuclear-en-el-mundo/>

- Foro de la Industria Nuclear Española. (2023). *Energía nuclear en España*. Retrieved from <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/energia-nuclear-en-espana/>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2023). *Fusión nuclear: una energía de futuro*. Retrieved from <https://www.foronuclear.org/recursos/publicaciones/fusion-nuclear-una-energia-de-futuro/>
- Foro de la Industria Nuclear Española. (2023). *Infografías*. Retrieved from <https://www.foronuclear.org/recursos/infografias/>
- García de Soria, X., Villasante, C., Cabrera, C., & Melognio, E. (2008). *Evaluación económico-financiera proyecto de un parque eólico de 10MW*. Dirección Nacional de Energía y Tecnología nuclear. República Oriental del Uruguay. Ministerio de Industria, Energía y Minería.
- García Fernández, A. (2020). *La energía nuclear salvará el mundo. Derribando mitos sobre la energía nuclear*. Barcelona: Planeta.
- García Fernández, A. (2022). *¿Cómo funciona una central nuclear?* Retrieved from Revista nuclear: <https://www.revistanuclear.es/divulgacion/como-funciona-una-central-nuclear/>
- García Gallo, B. (2013). Madrid dwellers fume in city poll. *El País*.
- Iberdrola. (2021). *Iberdrola pone en marcha su primera planta fotovoltaica en Castilla-La Mancha*. Retrieved from <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-pone-marcha-primer-planta-fotovoltaica-castilla-la-mancha#:~:text=Iberdrola%20acelera%20su%20estrategia%20renovable,50%20MW%20de%20potencia%20instalada>.
- International Energy Agency. (2020). *Projected Costs of Generating Electricity*.
- Kardoudi, O. (2021). China va a arrancar el primer reactor nuclear sin uranio del mundo. *El Confidencial*.
- Lazard. (2023). *Levelized Cost Of Energy+*.
- Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy conversion and management*, 2178-2199.
- Locatelli, G., Mancini, M, M., & Todeschini, N. (2013). Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects. *Energy Policy*, 1503-1520.
- Loving J. R., Yip A., & Nordhaus A. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy policy*, 371-382.

- Lozano Leyva, M. (2009). *Nucleares, ¿por qué no?* Barcelona: Debate.
- Martínez Moreno, C. (2017). *Reactores nucleares de IV Generación. Trabajo Fin de Grado*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Massachusetts Institute of Technology. (2009). *The Future of Nuclear Power*.
- Naciones Unidas. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Retrieved from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/poverty/>
- Notre-Environnement. (2023). Retrieved from <https://www.notre-environnement.gouv.fr/a-propos>
- Nuclear Energy Agency. (2023). *Levelised Cost of Electricity* . Retrieved from Nuclear Energy Agency: <https://www.oecd-neo.org/lcoe/>
- Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency. (2020). *Uranium 2020 Resources, Production and Demand*.
- Organismo Internacional de la Energía Atómica . (2021). *Según datos de 2021, la energía nucleoelectrónica puede ofrecer seguridad energética en medio de las crisis mundiales*. Retrieved from <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/estad%C3%ADsticas-pris-energia-nuclear-2021>
- Organismo Internacional de la Energía Atómica . (2023). *El accidente de la central nuclear de Chornóbil de 1986*. Retrieved from <https://www.iaea.org/es/temas/el-accidente-de-la-central-nuclear-de-chornobil-de-1986>
- Organismo Internacional de la Energía Atómica. (2023). *Accidente nuclear de Fukushima Daiichi*. Retrieved from <https://www.iaea.org/es/temas/accidente-nuclear-de-fukushima-daiichi>
- Organismo Internacional de la Energía Atómica. (2023). *Reactores modulares pequeños*. Retrieved from <https://www.iaea.org/es/temas/reactores-modulares-pequenos>
- Our world in data. (2023). *Our world in data*. Retrieved from Our world in data: <https://ourworldindata.org/>
- Pérez, J. (2018). *El coste de las centrales nucleares*. Retrieved from Organizaciones ecológicas y para la conservación del medio ambiente: <https://www.ompe.org/le-cout-des-centrales-nucleaires/>
- Perpiñá Villafruela, S. (2021). *Reactores Nucleares del Futuro. Camino a la Sostenibilidad a Largo Plazo de la Energía. Trabajo Fin de Grado*. Universidad de Valladolid.
- Red Eléctrica Española. (2023). Retrieved from <https://www.ree.es/>

- RTE France. (2023). Retrieved from <https://www.rte-france.com/en/home>
- Shirvan, K. (2022). *Overnight Capital Cost of the Next AP1000*. Massachusetts Institute of Technology.
- Sociedad Nuclear Española. (2023). *Producción eléctrica de origen nuclear*. Retrieved from <https://www.sne.es/preguntas-y-respuestas/produccion-electrica-origen-nuclear/es-muy-caro-el-kilovatio-hora-procedente-de-una-central-nuclear/>
- World Nuclear Association. (2020). *Generation IV Nuclear Reactors*. Retrieved from <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>
- World Nuclear Association. (2006). *The new nuclear economics of nuclear power*.
- World Nuclear Association. (2017). *Nuclear Power Economics and Project Structuring 2017 Edition*.
- World Nuclear Association. (2020). *Thorium*. Retrieved from <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>
- World Nuclear Association. (2022). *Economics of Nuclear Power*. Retrieved from <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>
- World Nuclear Association. (2022). *Three Mile Island Accident*. Retrieved from <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx>
- World Nuclear Association. (2023). *Nuclear Fusion Power*. Retrieved from <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power.aspx>
- World Nuclear Association. (2023). *Nuclear Power Reactors*. Retrieved from <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- World Nuclear Association. (2023). *Plans For New Reactors Worldwide*. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>
- World Nuclear Association. (2023). *Supply of Uranium*. Retrieved from <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>

