



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## **Reactores Modulares Compactos: Estudio de los materiales e impacto medioambiental**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Autor: CARLOS MORENO NOGUERA**

**Director: CRISTIAN SÁNCHEZ RODRÍGUEZ**

**Codirector: RAMÓN FRANCISCO PAMIES PORRAS**



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Cartagena, 19 de abril de 2024

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecer a Dr. Cristian Sánchez Rodríguez y Dr. Ramón Francisco Pamiés Porras, gracias por la oportunidad de haber podido realizar este trabajo, por vuestro incansable apoyo y orientación y por la infinita paciencia.

A mis padres y mis hermanos, por haberme apoyado incondicionalmente durante estos duros años de carrera.

A mi abuela Matilde, por haberme aconsejado estudiar una ingeniería y ser la primera que confío en mí.

A mis dos abuelos Luis y Pedro, sé que me cuidáis desde arriba.

A María, gracias por haberme aguantado estos últimos años, por haber estado ahí en mis momentos de frustración y sobre todo por haber aguantado mis conversaciones aburridas sobre ingeniería que en el fondo sé que no te interesaban, sin ti esta etapa hubiese sido mucho más difícil.

## Resumen

Actualmente, nuestra sociedad demanda una gran cantidad de recursos, tanto materiales como energéticos, los cuales son limitados. Por ello, se necesitan encontrar alternativas que ayuden a una transición hacia modelos energéticos sostenibles. La búsqueda de estos modelos sostenibles busca explotar de manera responsable los recursos energéticos sin comprometer el daño al medioambiente, la igualdad social y la economía.

La energía nuclear se espera que desempeñe un papel importante en esta transición, y más concretamente los Reactores Modulares Compactos (SMR por sus siglas en inglés). Estos reactores nucleares son capaces de generar hasta 300 MWe de energía sin emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, además de necesitar una menor cantidad de recursos para su construcción. Esto los convierte en una alternativa más segura y económica frente a las centrales nucleares convencionales, y una apuesta futura para reforzar los modelos energéticos de los países.

Los SMR basan su principio de funcionamiento en los reactores nucleares convencionales, aprovechando la energía liberada en la división de los átomos para generar vapor, el cual se utiliza para producir electricidad girando un alternador acoplado a una turbina.

El objetivo de este TFG se centra en el estudio de los materiales y del impacto medioambiental que supone la instalación de estos reactores. En primer lugar, se seleccionarán los materiales más importantes en función de sus propiedades y de su función, tales como resistencia a la corrosión, temperatura de servicio, precio, etc. A continuación, se evaluará el impacto medio ambiental de estos materiales y de su instalación, tanto para el ecosistema como para las personas.

Junto a lo anterior, también se realiza un estudio económico, incluyendo tanto instalación como operación de una planta de energía formada por SMRs frente a una planta nuclear convencional, para conocer la rentabilidad económica estimada de estos reactores y su competitividad frente a los reactores convencionales actuales.

# Abstract

Nowadays, our society demands a significant amount of resources, both material and energy, which are limited. Therefore, it is necessary to find alternatives that aid in transitioning towards sustainable energy models. The pursuit of these sustainable models aims to responsibly exploit energy resources without compromising damage to the environment, social equality, and economy.

Nuclear energy is expected to play a significant role in this transition, specifically through Small Modular Reactors (SMR). These nuclear reactors are capable of generating up to 300 MWe of energy with low emissions of greenhouse gases into the atmosphere, in addition to requiring fewer resources for their construction. This makes them a safer and more economical alternative to conventional nuclear power plants, and a future investment to reinforce the energy models of countries.

SMR operate on the principle of conventional nuclear reactors, harnessing the energy released in the splitting of atoms to generate steam, which is used to produce electricity by spinning a generator coupled to a turbine.

The objective of this Bachelor's Thesis focuses on the study of materials and the environmental impact of installing these reactors. Firstly, the most important materials will be selected based on their properties and their functionality, such as corrosion resistance, service temperature, price, etc. Subsequently, the environmental impact of these materials and their installation will be evaluated, both on the ecosystem and people.

Finally, an economic study is also conducted, including both the installation and operation of a SMRs power plant compared to a conventional nuclear power plant, to determine the estimated economic profitability of these reactors and their competitiveness against current conventional reactors.

# Índice

Agradecimientos.....	2
Resumen .....	3
Abstract.....	4
Índice .....	5
Figuras .....	8
Tablas .....	10
Glosario .....	12
Capítulo 1: La energía nuclear.....	1
1.1. Introducción a la energía nuclear.....	1
1.1.1. Fisión nuclear .....	4
1.1.2. Fusión nuclear .....	5
1.2. Centrales nucleares .....	6
1.3. Historia de la energía nuclear en España .....	9
Capítulo 2: Reactores Nucleares Compactos .....	13
2.1. Introducción a los SMR .....	13
2.2. Clasificación de los SMR .....	15
2.2.1. mPower.....	15
2.2.2. Westinhouse SMR.....	16
2.2.3. NuScale .....	18
2.2.4. Otros tipos de SMR.....	19
2.2.4.1. Reactores refrigerados por gas .....	19
2.2.4.2. Reactores refrigerados por metales líquidos.....	19
2.3. Normativa aplicable a los SMR. Seguridad.....	20
2.3.1. Normativa. Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear .....	21
2.3.2. Reglamentos de seguridad nuclear en España.....	21
2.3.2.1. El Real Decreto 1400/2018, de 23 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre seguridad nuclear en instalaciones nucleares. ....	21
2.3.2.2. El Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. ....	21
2.3.2.3. Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos.....	22

Capítulo 3: Selección de materiales.....	23
3.1. Propiedades más relevantes de los materiales en los SMR.....	23
3.1.1. Precio.....	23
3.1.2. Temperatura máxima de servicio .....	24
3.1.3. Durabilidad.....	25
3.1.4. Huella de carbono.....	28
3.1.5. Uso de agua .....	28
3.1.6. Fin de vida y reciclabilidad .....	29
3.1.7. Energía contenida .....	31
3.2. Estudio de los materiales .....	32
3.2.1. Vasija de contención .....	32
3.2.1.1. Revestimiento exterior.....	32
3.2.1.2. Revestimiento interior .....	36
3.2.2. Componentes internos .....	39
3.2.2.1. Barras de control.....	39
3.2.2.2. Combustible nuclear .....	42
3.2.2.3. Moderadores .....	44
Capítulo 4: Impacto medioambiental .....	47
4.1. Impacto en la atmósfera.....	47
4.1.1. Diseño.....	47
4.1.2. Construcción.....	48
4.1.3. Operación .....	49
4.1.4. Desmantelamiento .....	49
4.2. Impacto en el suelo .....	50
4.2.1. Construcción.....	50
4.2.2. Operación .....	51
4.2.3. Desmantelamiento .....	51
4.3. Impacto en el medio acuático .....	51
4.3.1. Construcción.....	51
4.3.2. Operación .....	51
4.3.3. Desmantelamiento .....	52
4.4. Impacto en la flora y la fauna local.....	52
4.4.1. Construcción.....	52
4.4.2. Operación .....	53

4.4.3. Desmantelamiento .....	53
4.5. Impacto en los humanos y la sociedad.....	53
4.6. Gestión del combustible nuclear gastado.....	53
4.7. Gestión de los desechos no radiactivos.....	54
4.8. Impacto medioambiental en caso de accidente.....	55
Capítulo 5: Estudio económico .....	57
5.1. Central nuclear convencional.....	57
5.2. Central nuclear SMR .....	58
5.2.1. Diseño de la planta .....	58
5.2.2. Cálculo de costes.....	59
Capítulo 6: Conclusiones y ampliación.....	62
6.1. Ventajas y desventajas más importantes.....	62
6.2. Materiales.....	63
6.3. Sostenibilidad.....	63
6.4. Conclusión .....	64
6.5. Futuras líneas de trabajo .....	64
Anexos.....	66
Bibliografía.....	69

# Figuras

Ilustración 1. Representación de la estructura de un átomo [1].....	1
Ilustración 2. Tipos de radiación ionizante [3].....	3
Ilustración 3. Fisión nuclear y reacción en cadena (Gráfico: A. Vargas/OIEA) [4]. ....	5
Ilustración 4. Fusión de deuterio con tritio [4]. ....	6
Ilustración 5. Esquema de una central nuclear [5].....	7
Ilustración 6. Esquema de un reactor de agua a presión [5]. ....	8
Ilustración 7. Reactor de agua en ebullición (BWR) [5]. ....	8
Ilustración 8. Distribución de las centrales nucleares en España [6].....	10
Ilustración 9. Distribución de la generación de energía eléctrica en España en 2023 [7]. .....	11
Ilustración 10. Países con más reactores nucleares en funcionamiento [8].....	11
Ilustración 11. Sección transversal del reactor mPower [11]. ....	16
Ilustración 12. Sección transversal del reactor Westinhouse [11]. ....	17
Ilustración 13. Sección transversal del reactor NuScale [11]. ....	18
Ilustración 14. Diseño de un SMR refrigerado por gas [12]. ....	19
Ilustración 15. Esquema de un reactor refrigerado por sales de sodio [12].....	20
Ilustración 16. Relación entre el precio y la familia de material. ....	23
Ilustración 17. Relación entre la temperatura máxima de servicio y la familia de material. .....	25
Ilustración 18. Porcentaje de cromo en los aceros inoxidable. ....	27
Ilustración 19. Impacto de la huella de carbono en función del tipo de fabricación. ....	28
Ilustración 20. Uso de agua en función de la familia de material. ....	29
Ilustración 21. Relación entre la energía contenida en función de la familia de material. .....	31
Ilustración 22. Reacciones químicas en la obtención del Clínter [15]. ....	35
Ilustración 23. Ejemplos de hormigón basado en geopolímeros en obra. ....	36
Ilustración 24. Vasija del reactor modular NuScale [16]. ....	36
Ilustración 25. Disposición de los elementos combustibles en un reactor nuclear.....	43
Ilustración 26. Estructura atómica del grafito [18]. ....	45
Ilustración 27. Distribución en la emisión de CO <sub>2</sub> durante la vida de los SMR. ....	50
Ilustración 28. Ciclo del combustible nuclear en España [21]. ....	54
Ilustración 29. Diseño de la sala del reactor [23]. ....	58

Ilustración 30. Diseño de la central [23].....	59
Ilustración 31. Distribución de costes LW-SMR. ....	60

## Tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los SMR.....	15
Tabla 2. Distribución del número de materiales por familia en función de su resistencia al agua.....	26
Tabla 3. Resistencia a la corrosión AISI 304 y AISI 446. ....	27
Tabla 4. Resumen de opciones de fin de vida de los materiales. ....	30
Tabla 5. Composición del hormigón de alta densidad.....	33
Tabla 6. Módulo de Young del hormigón convencional y de alta densidad. ....	33
Tabla 7. Precio hormigón convencional y de alta densidad. ....	34
Tabla 8. Energía contenida y huella de carbono en la producción del hormigón de alta densidad.....	34
Tabla 9. Reciclabilidad del hormigón de alta densidad.....	34
Tabla 10. Comparativa hormigón basado en geopolímeros y hormigón de alta densidad. ....	35
Tabla 11. Composición del acero inoxidable AISI 304.....	37
Tabla 12. Propiedades principales del acero inoxidable AISI 304.....	38
Tabla 13. Reciclabilidad del acero inoxidable AISI 304.....	38
Tabla 14. Comparativa propiedades acero AISI 201 y AISI 329.....	39
Tabla 15. Propiedades principales del hafnio.....	40
Tabla 16. Producción y reciclabilidad del hafnio.....	40
Tabla 17. Propiedades principales del boro.....	41
Tabla 18. Producción y reciclabilidad del carburo de boro.....	41
Tabla 19. Propiedades principales del cadmio. ....	42
Tabla 20. Producción y reciclabilidad del cadmio. ....	42
Tabla 21. Propiedades principales del dióxido de uranio.....	43
Tabla 22. Composición de la aleación de circonio.....	44
Tabla 23. Propiedades principales de la aleación de circonio. ....	44
Tabla 24. Propiedades principales del grafito. ....	45
Tabla 25. Comparativo reactor AP1000 y Westinhouse SMR.....	47
Tabla 26. Resultados de emisiones de CO <sub>2</sub> hormigón de alta densidad.....	48
Tabla 27. Resultados de emisión de CO acero corrugado.....	48
Tabla 28. Emisión de CO <sub>2</sub> en función de los MWe generados. ....	48

Tabla 29. Comparativa del impacto en la huella de carbono en las operaciones de construcción por año.....	49
Tabla 30. Caudal de agua y aumento de temperatura en una central de 1MWe. ....	52
Tabla 31. Cálculo de costes PWR12-BE [22]. ....	57
Tabla 32. Cálculo de costes LW-SMR [22]. ....	60
Tabla 33. Comparativa costes PWR12-BE y LW-SMR. ....	61
Tabla 34. Comparativa tiempo de construcción PWR12-BE y LW-SMR.....	61
Tabla 35. Comparativo costes O&M PWR12-BE y LW-SMR.....	61

# **Glosario**

SMR: Small Modular Reactor

LWR: Light Water Reactor

PWR: Pressure Water Reactor

BWR: Boiling Water Reactor

eV: Electronvoltio

MOX: Mezcla de Óxidos

V: Voltio

W: Vatio

JEN: Junta de Energía Nuclear

CSN: Consejo de Seguridad Nuclear

# Capítulo 1: La energía nuclear

## 1.1. Introducción a la energía nuclear

Antes de comenzar, es interesante realizar una breve introducción sobre los conceptos que son necesarios para comprender como funciona la energía nuclear, y que además se repetirán a lo largo de este TFG.

En primer lugar, comenzaremos definiendo la materia en su escala más básica. La materia ordinaria está formada por unas partículas fundamentales llamadas átomos. Estos átomos a su vez están formados por partículas subatómicas, dispuestas como un núcleo de protones y neutrones, con una nube de electrones alrededor, tal y como podemos observar en la Ilustración 1 [1].

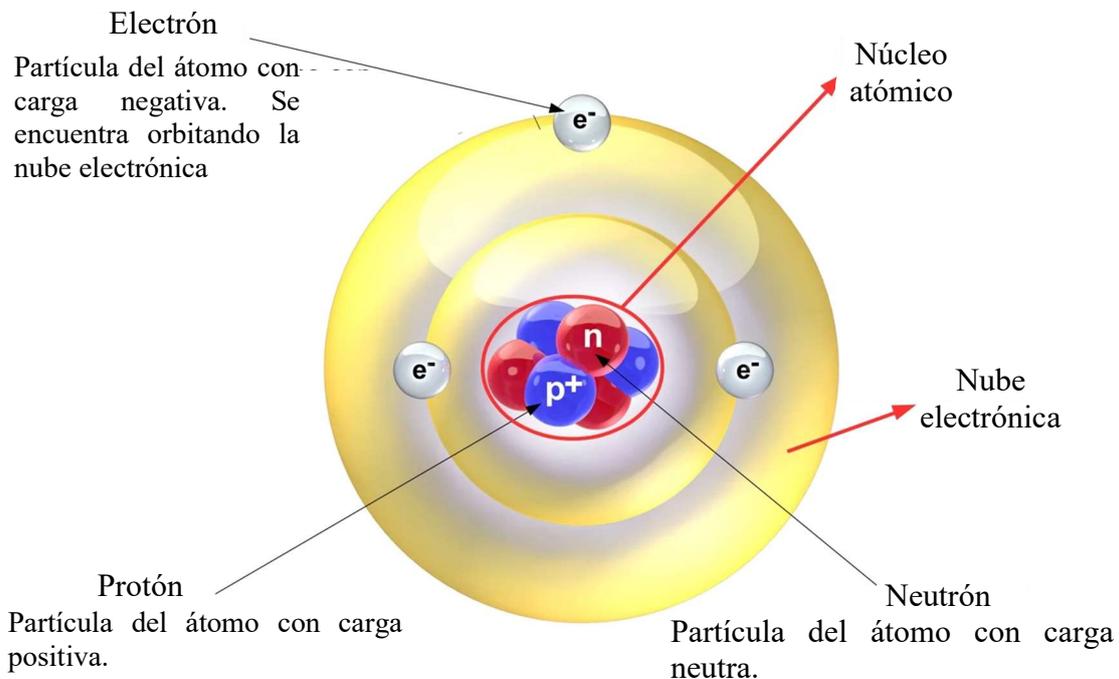


Ilustración 1. Representación de la estructura de un átomo [1].

Siguiendo la ilustración anterior, podemos ver que los protones poseen carga eléctrica positiva y los neutrones carga eléctrica neutra, es decir, no poseen carga eléctrica. Estas cargas del mismo signo en los protones generan una fuerza de repulsión que tiende a separarlos. La fuerza responsable de vencer esta repulsión electromagnética y mantener el núcleo unido es la fuerza nuclear fuerte, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la física. Los electrones a su vez poseen carga eléctrica negativa, por lo que son atraídos

hacia el núcleo del átomo, la fuerza responsable de mantener los electrones orbitando alrededor del átomo es la fuerza nuclear débil, otra de las cuatro fuerzas fundamentales de la física [1]. Los protones además juegan un papel fundamental en la materia, el número de protones en el átomo determina las propiedades químicas y qué elemento es.

Por otro lado, el número de neutrones determina la estabilidad del átomo, ya que si el número de protones es igual al número de neutrones, el átomo es estable. Sin embargo, el número de neutrones en el núcleo de ciertos átomos puede variar y ser distinto al número de protones, en este caso el átomo se vuelve inestable y se denomina isótopo. Un mismo elemento químico puede tener varios isótopos, por ejemplo, el uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: uranio-238 ( $^{238}\text{U}$ ) el cual posee 146 neutrones, uranio-235 ( $^{235}\text{U}$ ) el cual posee 143 neutrones y uranio-234 ( $^{234}\text{U}$ ) el cual posee 140 neutrones. Cada gramo de uranio natural está formado por más de un 99% de uranio-238 (238 hace referencia al número de protones) y por menos de un 1% de uranio-235, el cual es el elemento más utilizado en las centrales nucleares como combustible nuclear [1].

Estos isótopos, además, pierden energía mediante la emisión de radiación hasta convertirse en átomos estables, a este proceso se le conoce como radiación nuclear o radiactividad. La velocidad con la que un determinado isótopo se transforma en otro más estable se mide mediante la constante de desintegración ( $\lambda$ ), característica de cada isótopo [2].

Pasado un tiempo, la mitad de los átomos inestables de un isótopo se habrán convertido en átomos estables. A ese periodo de tiempo se le conoce como periodo de desintegración, T. El periodo de desintegración de cada isótopo tiene valores muy distintos entre uno y otro, por ejemplo, el T del polonio-211 es de 0,52 segundos, mientras que el del uranio-238 son  $4,5 \times 10^9$  años [2].

Ahora que ya sabemos cómo se desintegra un isótopo, podemos explicar los tipos de desintegración que conocemos.

En primer lugar, a continuación podemos ver la Ilustración 2 en la que se muestran los tres tipos de radiación ionizante que vamos a explicar:

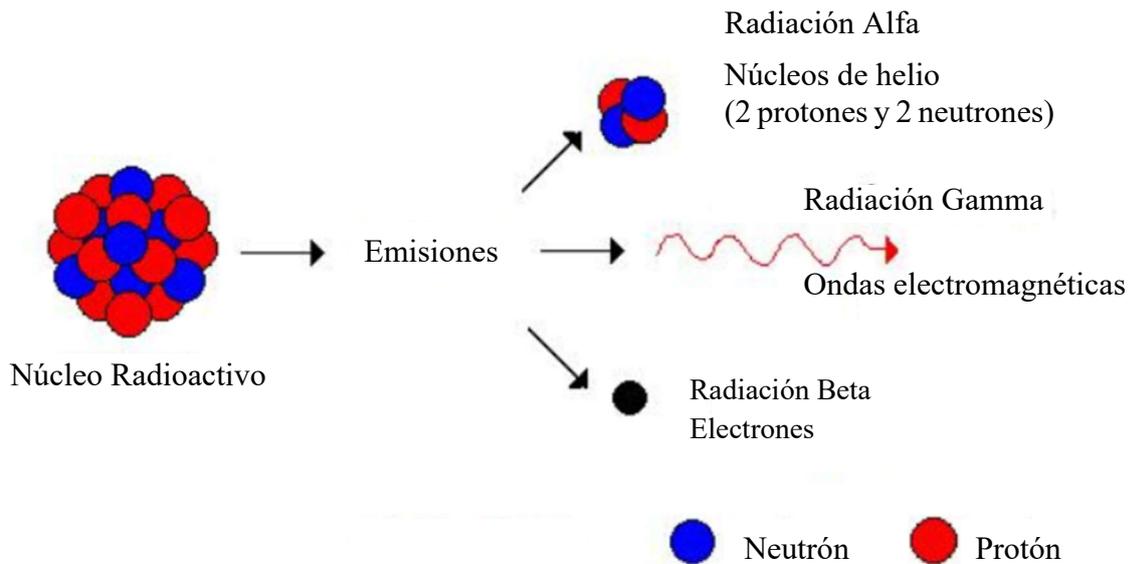


Ilustración 2. Tipos de radiación ionizante [3].

- Desintegración alfa ( $\alpha$ )

La desintegración alfa consiste la emisión de partículas con carga positiva, compuestas por dos neutrones y dos protones (núcleos de helio). Son tan poco penetrantes que no pueden atravesar una hoja de papel, por lo que no entrañan peligro para el cuerpo humano. La energía emitida por las partículas alfa varía en función del tamaño del núcleo, cuanto más pesado es éste, mayor será esta energía, aun así, la mayoría de las partículas alfa tienen una energía de entre 3 y 7 MeV, siendo un electronvoltio la energía adquirida por un electrón al trasladarse entre dos puntos con una diferencia de potencial de 1 voltio [2].

- Desintegración beta ( $\beta$ )

Son flujos de electrones o positrones resultantes de la desintegración de los neutrones o protones del núcleo cuando este se encuentra en un estado excitado. Es más penetrante que la radiación beta, suele ser necesaria una lámina de hierro de pequeño grosor para frenarla. La energía de la radiación beta varía en función de la desintegración producida, y va desde unos cientos de keV, hasta unos pocos MeV. Por ejemplo, en la desintegración del carbono-14 se emiten positrones con una energía media de 156 keV. Por otro lado, en la desintegración del potasio-40 esta energía es de unos 1,3 MeV [2].

- Radiación gamma ( $\gamma$ )

La radiación gamma se trata de ondas electromagnéticas. Es el tipo de radiación más penetrante debido a que son ondas electromagnéticas de longitud de onda corta, desde los

$10^{-10}m$  hasta los  $10^{-1} m$ , con un rango de energía que varía desde los  $10^4 eV$  hasta los  $10^8 eV$ , siendo el electronvoltio (eV) como la energía cinética que adquiere un electrón al ser acelerado con una diferencia de potencial de 1V desde un estado de reposo. Para detener este tipo de radiación se necesitan capas gruesas de plomo u hormigón. Es el tipo de radiación más peligroso y el que representa un mayor peligro para el ser humano, debido a que es capaz de variar el ADN de nuestras células y provocar graves enfermedades como cáncer [2].

Una vez que ya conocemos los conceptos fundamentales sobre la materia, podemos adentrarnos en explicar en qué consiste la energía nuclear. La energía nuclear es la energía contenida en el núcleo del átomo y se puede liberar de dos formas: fisión y fusión nuclear.

### **1.1.1. Fisión nuclear**

La fisión nuclear es la división del núcleo atómico, produciendo una liberación de energía y unos productos de fisión. Es decir, consiste en partir el átomo en dos para liberar la energía que mantenía unidos a los protones y los neutrones. Al dividirse el átomo en dos partes iguales, estas dos partes tendrán un número de protones y neutrones distinto al del átomo original, y como el número de protones determina el elemento químico tal y como hemos visto antes, estos productos de fisión son en realidad átomos de un elemento químico distinto y más ligero que el átomo original [4].

Para que se produzca la división del átomo, es necesario que una partícula impacte contra su núcleo. Las partículas responsables de que se produzca la fisión del átomo son los neutrones. Cuando un neutrón choca con el núcleo de un átomo, éste lo absorbe y se vuelve inestable, y en consecuencia, se produce su división en productos más ligeros hasta alcanzar un estado de mayor estabilidad. Además de estos productos, se generan también más neutrones, que impactan contra otros núcleos produciendo su fisión. A este efecto se le conoce como reacción en cadena, y es clave en el funcionamiento de las centrales nucleares. Podemos visualizar una representación de una reacción en cadena en la Ilustración 3 [4].

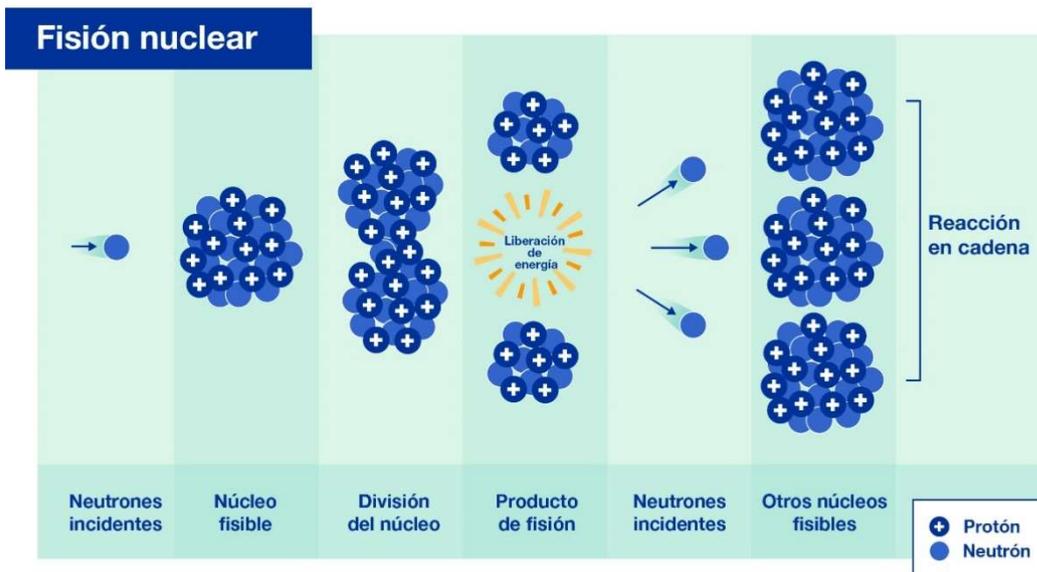


Ilustración 3. Fisión nuclear y reacción en cadena (Gráfico: A. Vargas/OIEA) [4].

Sin embargo, los neutrones que se generan en esas colisiones tienen una elevada energía cinética, lo cual reduce las probabilidades de que colisionen con otros átomos y produzcan fisión. Por lo tanto, es necesario reducir su velocidad, esto se consigue con choques elásticos de los neutrones con un elemento que actúa como moderador. En las centrales nucleares españolas el moderador utilizado es el agua ligera, aunque también son comúnmente utilizados el grafito y el agua pesada [5]. Podemos definir el agua ligera como agua común, es decir, aquella que se extrae de un lago, río o mar cercano a la central y que tras un proceso de filtrado es introducida en el circuito de refrigeración de la central. El agua pesada, en cambio, es similar al agua común, pero con la diferencia de que, en lugar de estar formada por hidrógeno, está formada por un isótopo de éste, el deuterio. El agua presenta prácticamente las mismas propiedades que el agua ligera, con la diferencia de que es un 11% más densa, además es capaz de reducir la velocidad de los neutrones sin llegar a absorberlos. Por ello, la hace mucho más útil que el agua común a la hora de utilizarla como moderador. El grafito en cambio es una forma alotrópica del carbono que es capaz de soportar altas temperaturas y de reducir la velocidad de los neutrones que impactan contra sus átomos.

### 1.1.2. Fusión nuclear

La fusión nuclear es la reacción opuesta a la fisión, en la cual dos núcleos de átomos ligeros, los cuales son generalmente deuterio y tritio, dos isótopos del hidrógeno se unen para formar otro núcleo más pesado, liberando partículas y energía durante el proceso.

Un ejemplo de fusión nuclear son las estrellas como nuestro Sol. En el núcleo de las estrellas, debido a la inmensa gravedad y temperatura, se produce la fusión de núcleos de hidrógeno u otros elementos para formar elementos más pesados, liberando en el proceso una gran cantidad de energía en forma de radiación electromagnética. En la Ilustración 4 podemos ver un ejemplo de reacción de fusión nuclear [4].

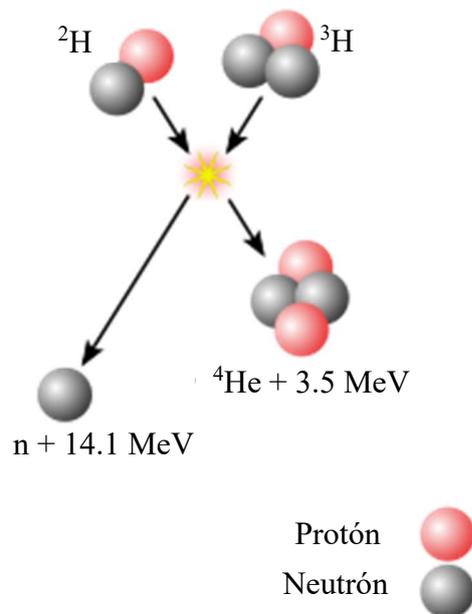


Ilustración 4. Fusión de deuterio con tritio [4].

## 1.2. Centrales nucleares

Tal y como hemos visto antes, la fisión nuclear es capaz de liberar una enorme cantidad de energía térmica, por ello, esta energía térmica puede ser aprovechada para producir energía eléctrica. Y esto ocurre en las centrales nucleares, las cuales son instalaciones industriales en las que se transforma la energía liberada por la fisión nuclear en electricidad.

El principio de funcionamiento de una central nuclear es análogo al de una central térmica convencional, consiste en aprovechar la energía térmica liberada por un combustible en energía mecánica, y esta energía mecánica en energía eléctrica.

Una central nuclear está compuesta fundamentalmente por cuatro partes, las cuales podemos ver en la Ilustración 5:

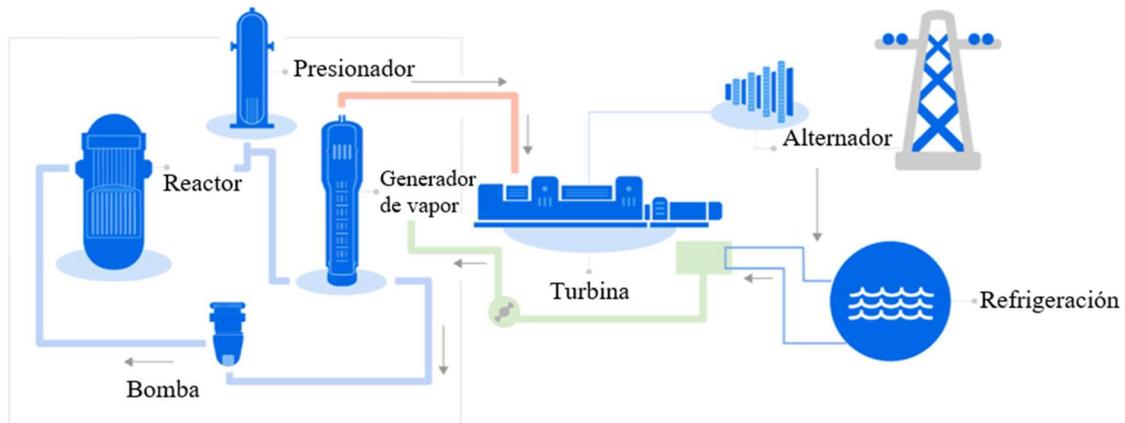


Ilustración 5. Esquema de una central nuclear [5].

## 1. Reactor

El reactor es el componente principal de una central nuclear ya que es el lugar donde se aloja el combustible nuclear y que cuenta con sistemas que permiten iniciar, mantener y detener, de manera controlada, las reacciones nucleares [5].

El reactor está formado por una vasija de acero en cuyo interior se disponen los elementos de combustible nuclear, cuyos átomos son los encargados de fisionarse y generar energía. Aunque el combustible nuclear puede ser de varios tipos, el más común es el óxido de uranio ligeramente enriquecido ( $U_3O_8$ ), el cual analizaremos en profundidad más adelante [5].

Por otro lado, para controlar de manera segura las reacciones de fisión que tienen lugar en el núcleo del reactor, existen unos mecanismos denominados barras de control, que contienen un material que es capaz de absorber los neutrones. Estas barras de control se pueden introducir de manera total o parcial dentro de la vasija del reactor, con el objetivo de reducir o incluso parar las reacciones de fisión. Entre los materiales más usados para su fabricación, destacan el berilio o el grafito [5].

## 2. Generador de vapor

Tal y como hemos visto antes, la vasija del núcleo del reactor está rellena de un líquido que actúa como moderador, generalmente agua ligera o agua pesada. Este líquido además tiene la función de absorber el calor emitido por las reacciones de fisión y mantener el núcleo refrigerado. Este líquido que está en contacto con los elementos de combustible nuclear circula dentro de un circuito cerrado llamado circuito primario. La energía térmica que ha absorbido el refrigerante del circuito primario es la que se utilizará para generar

vapor. Existen diferentes configuraciones de reactor en función del lugar donde se produzca el vapor, las dos más utilizadas son [5]:

- Reactores de Agua a Presión, el agua circula en estado líquido a través del reactor a muy alta presión y su transformación en vapor se produce fuera del reactor, en un intercambiador de calor. Se puede ver un ejemplo en la Ilustración 6.

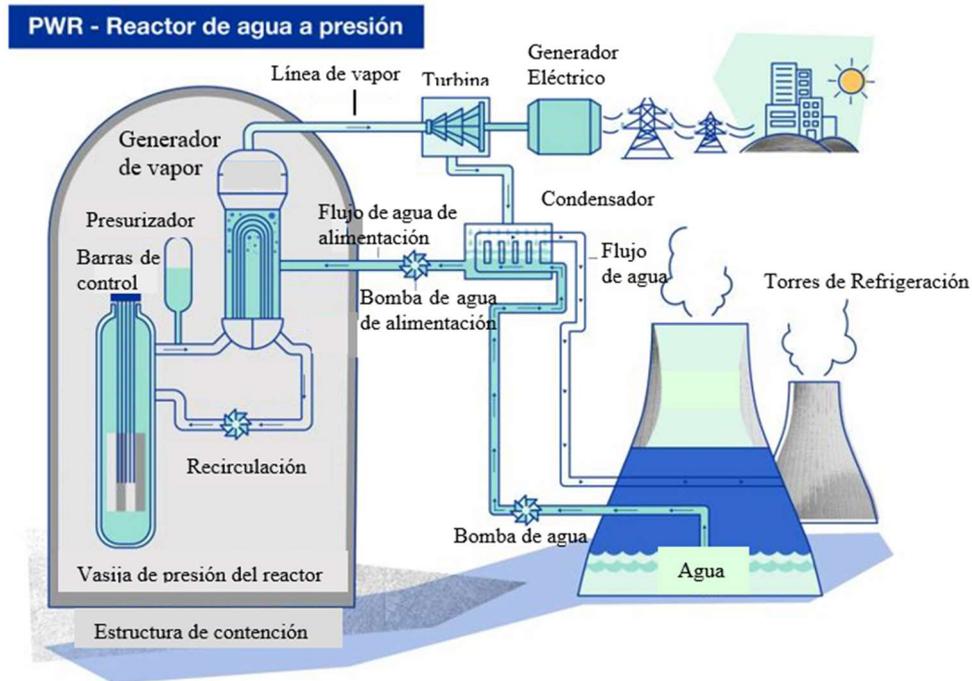
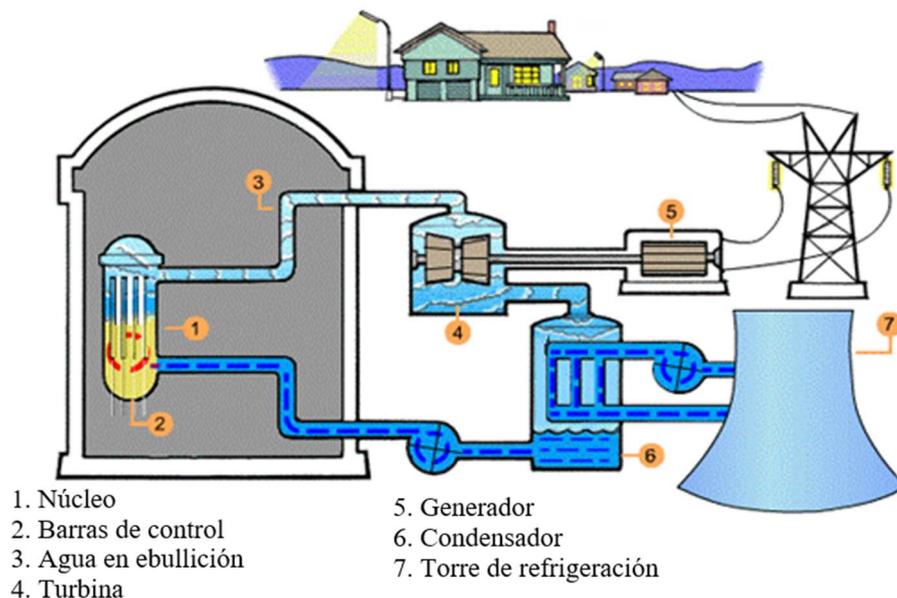


Ilustración 6. Esquema de un reactor de agua a presión [5].

- Reactores de Agua en Ebullición, el vapor se produce directamente en el interior de la vasija del reactor. Como podemos ver en la Ilustración 7.



- |                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| 1. Núcleo             | 5. Generador              |
| 2. Barras de control  | 6. Condensador            |
| 3. Agua en ebullición | 7. Torre de refrigeración |
| 4. Turbina            |                           |

Ilustración 7. Reactor de agua en ebullición (BWR) [5].

### 3. Turbina de vapor

Una vez que el vapor a alta presión sale del generador de vapor, es llevado hacia la turbina, dónde se expande y hace rotar un eje. Dicho eje está unido a un alternador el cual transforma la energía mecánica en energía eléctrica [5].

### 4. Condensador

Por último, el vapor abandona la turbina habiendo reducido su presión y temperatura, este vapor es recogido por el condensador, el cual se encarga de devolverlo a estado líquido. Esta condensación se realiza gracias a un circuito externo de refrigeración que utiliza un gran caudal de agua que circula por el interior de los tubos del condensador, transportando la energía térmica hasta el foco frío de la central, el cual suele ser un pantano, río o el mar. El agua resultante se vuelve a impulsar hacia el generador de vapor precalentándola previamente para repetir el ciclo [5].

En las centrales nucleares, la presión del condensador es menor que la del circuito de refrigeración exterior, por lo que, en el caso de producirse una fuga, sería el agua del exterior la que entraría en el condensador, evitando así fugas al medioambiente [5].

## **1.3. Historia de la energía nuclear en España**

El inicio de la energía nuclear en España se remonta al año 1948, con la formación de la Junta de Investigaciones Atómicas, formado por científicos y militares y situado en el Laboratorio y Taller de Investigación del Estado Mayor de la Armada. Esta organización se enfocó en tres actividades: la formación de personal de alta cualificación, el estudio de la explotación de yacimientos de uranio y el desarrollo de técnicas relacionadas con la extracción, metalurgia y física del uranio [4].

En 1951, este organismo cambio de nombre a Junta de Energía Nuclear (JEN) como centro de investigación y desarrollo de la tecnología nuclear en España. En 1967, la JEN puso en marcha una pequeña instalación piloto llamada Planta Caliente M-1 para el tratamiento de los primeros combustibles irradiados producidos en España y procedentes del reactor JEN-1 [2].

Entre los años 1968 y 1970 se pusieron en marcha las centrales nucleares de José Cabrera, Vandellós I y Santa María de Garoña, que constituyeron la primera generación de centrales nucleares en España [4].

En 1980, con la ley de creación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la JEN se divide

en dos organismos: el CSN se encargaría de las funciones reguladoras en materia de seguridad nuclear y protección radiológica, y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), se encargaría de los proyectos de investigación y desarrollo en cuatro áreas diferenciadas: investigación básica (fusión y altas energías), tecnología nuclear, protección radiológica y medio ambiente y energías renovables [4].

En 1984 se constituyó por Real Decreto la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), con la responsabilidad de establecer planes para la gestión de los residuos radiactivos y poner en marcha un sistema de gestión de los residuos de baja y media actividad generados en España. En 1992 entró en funcionamiento el Centro de Almacenamiento de Residuos de Baja y Media Actividad de El Cabril, en la provincia de Córdoba. Entre los años 1980 y 1989 se pusieron en marcha las centrales de Almaraz, Ascó, Cofrentes, Vandellós II y Trillo [4].

En la actualidad, en España existen siete centrales nucleares en funcionamiento, distribuidas según la Ilustración 8 [6].



Ilustración 8. Distribución de las centrales nucleares en España [6].

Según datos de Red Eléctrica, en el año 2023 en España se generaron 56.596 GWh de energía eléctrica procedentes de las centrales nucleares, esto supuso un 20,3% del total de energía generada en España en 2023 [7].

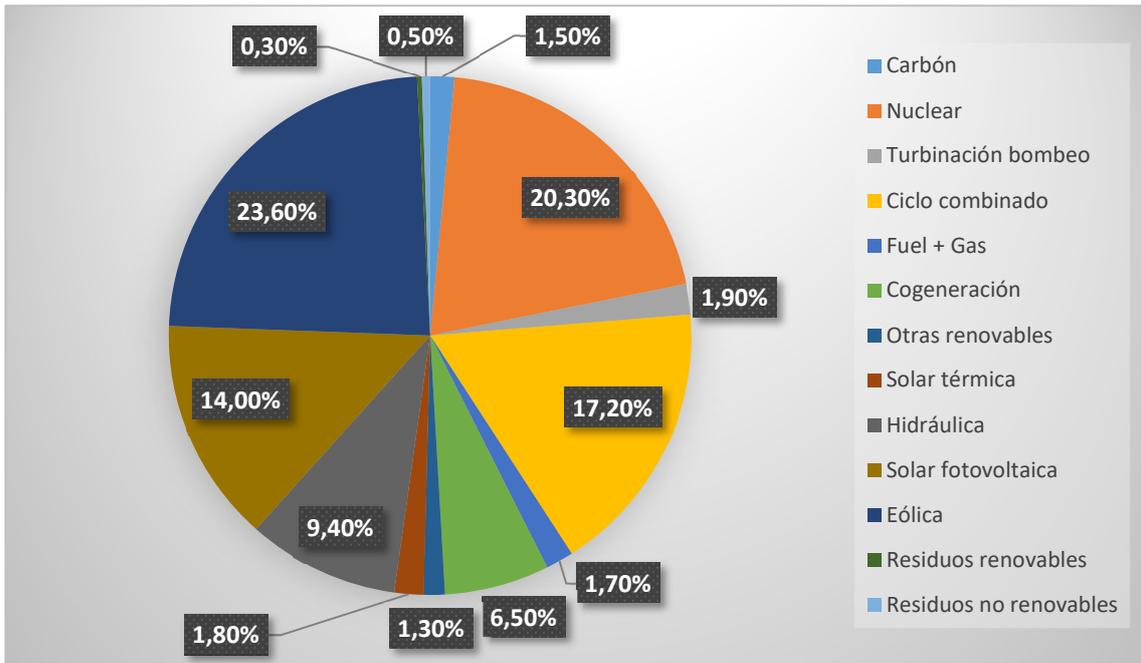


Ilustración 9. Distribución de la generación de energía eléctrica en España en 2023 [7].

Por lo tanto, podemos ver que la energía nuclear actualmente juega un papel muy importante en el mercado eléctrico español. Sin embargo, si comparamos estos datos con el resto de los países en el mundo, vemos que aún estamos muy por debajo de algunas de las potencias mundiales. A continuación, podemos ver una tabla en la que se muestran los países con mayor número de reactores nucleares en funcionamiento [8].

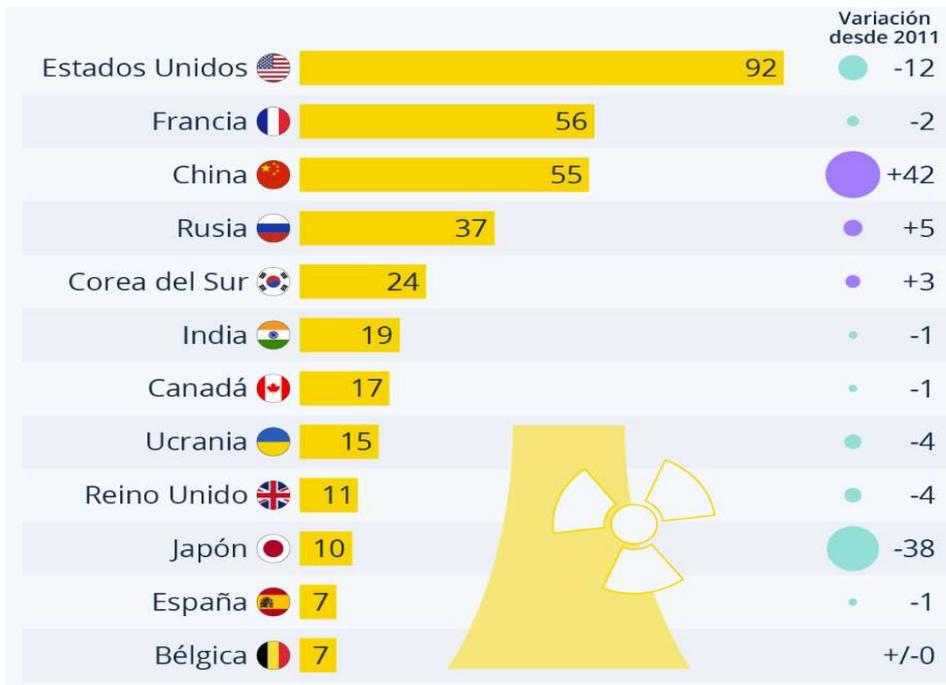


Ilustración 10. Países con más reactores nucleares en funcionamiento [8].

Si analizamos los datos de la anterior imagen, vemos que, aunque desde 2011 se ha producido el cierre de numerosos reactores nucleares debido a su fin de ciclo de vida, las principales potencias del mundo aún conservan un número muy elevado de estos reactores en funcionamiento. Destacan por ejemplo los números de China, ya que desde 2011 se han construido 42 nuevos reactores, con 22 más actualmente en construcción. En los próximos años, se espera que el número de reactores nucleares de EE. UU., China y Rusia aumente considerablemente con la licencia de los SMR.

## Capítulo 2: Reactores Nucleares Compactos

### 2.1. Introducción a los SMR

La energía nuclear siempre ha sido un tema de debate en nuestra sociedad. Por un lado, la energía nuclear genera radioactividad, la cuál es perjudicial para los seres vivos si no es contenida de manera adecuada en el núcleo del reactor. Y, por otro lado, las centrales nucleares convencionales requieren una gran inversión económica para su construcción y funcionamiento.

En este contexto de inseguridad frente a las centrales nucleares convencionales, surgieron los reactores modulares compactos. El comienzo del desarrollo de los SMR se remonta a comienzos de la década de 1950. Inicialmente, los SMR se desarrollaron con la idea de que sirvieran como propulsión para los nuevos submarinos nucleares, es decir, tan compactos como para caber dentro de un submarino, pero lo suficientemente potentes como para generar energía ininterrumpida durante años.

Actualmente, existen una gran variedad de modelos de SMR en desarrollo (PWR, agua ligera, refrigeración por sodio, refrigeración por plomo, etc.) pero todas ellas coinciden en definir los SMR como unos reactores compactos y modulares, capaces de generar hasta 300MW de energía eléctrica [9].

A continuación, vamos a introducir algunas de las ventajas y desventajas de los SMR frente a los reactores convencionales:

#### **Ventajas**

En primer lugar, haciendo honor a su nombre, la ventaja principal de los SMR es su tamaño compacto, esto hace que los SMR se puedan instalar en zonas remotas o de difícil acceso a la red eléctrica, a la par que reduce los costes de instalación [9].

La siguiente ventaja, también hace referencia a su nombre y es la capacidad de ser modulares, es decir, es posible fabricarlos mediante procesos industriales y transportarlos de una sola pieza al lugar de instalación. Además, permite agregar o reemplazar cualquier módulo sin afectar al resto del sistema [9,10].

En cuanto al ciclo de operación, los SMR tienen un mayor ciclo de operación y unos menores intervalos de sustitución de combustible que los reactores convencionales, estimando incluso hasta 10-15 años sin necesidad de agregar o sustituir los elementos

combustibles del núcleo. Esto se traduce a su vez en unos menores costes de operación y mantenimiento [9].

Otra de las ventajas de los SMR es su versatilidad, es decir, permiten aprovechar el diseño de los SMR no sólo para generar energía, sino también para generar calor, desalar agua, etc. Esto es debido a que estos procesos necesitan de una gran cantidad de energía, siendo imprescindible alimentarlos con fuentes que no generen grandes emisiones de carbono, por ejemplo, el calor y la energía generada por los SMR pueden ser utilizados para alimentar los procesos de ósmosis del agua salada para convertirla en agua dulce, ya que en este proceso se necesitan temperaturas de hasta 150°C. Otra opción pasa por aprovechar ese calor para producir hidrógeno u otros gases, o emplearlo para usos de calefacción o refrigeración. Esto se traduce en una mayor versatilidad de aplicaciones y una mayor rentabilidad económica, ya que con un solo reactor tenemos la capacidad de cubrir varios procesos de forma simultánea [9].

Por último, otra característica importante de los SMR es su seguridad pasiva. A pesar de que los reactores convencionales en la época actual son muy seguros, los últimos desarrollos en los sistemas de seguridad de los SMR muestran una mejora en los sistemas de seguridad pasiva de los mismos, lo que se traduce en una menor dependencia del error humano y una mayor seguridad a la hora de mantener el reactor en operación en todo momento [9,10]. Debido a que como podemos ver en el punto 2.2. Clasificación de los SMR, estos emplean el uso de la gravedad para favorecer la circulación natural del refrigerante sin la necesidad del uso de bombas, lo cual permite reducir enormemente los riesgos por accidentes nucleares relacionados con un exceso de temperatura en el núcleo del reactor.

### **Desventajas**

Tal y como hemos visto, los SMR tienen una serie de ventajas importantes frente a los reactores convencionales. Sin embargo, también tenemos que considerar las siguientes desventajas.

En primer lugar, los modelos de SMR en etapas más avanzadas, diseñados por EEUU, China y Rusia, aún están en fase de obtener la licencia, y esto podría llevar más tiempo del que inicialmente se estimaba. A pesar de que requieran menores intervalos de cambio de combustible, al estar localizados en áreas remotas podría suponer un difícil transporte del nuevo combustible nuclear y de la retirada del combustible nuclear gastado [10].

También, uno de los factores importantes es conseguir la aceptación social a este nuevo tipo de reactores. Por último, no debemos olvidar que estos reactores aún están en fase de desarrollo o diseño, y es posible que surjan nuevos problemas a la hora de su construcción [9].

A continuación, se resumen las ventajas y desventajas en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los SMR.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Tamaño compacto	Fase de licencia
Menor coste de instalación	Difícil acceso a zonas remotas
Modulares	Aceptación social
Mayor ciclo de vida de operación	Problemas desconocidos
Menores costes de operación	
Versatilidad	
Mayor seguridad pasiva	

## **2.2. Clasificación de los SMR**

En un primer vistazo, los SMR se pueden clasificar en función del refrigerante que utilizan para enfriar el núcleo. Aunque existen numerosos diseños hoy en día, en este TFG nos vamos a centrar en los SMR refrigerados por agua ligera (LWR) debido a que son los que actualmente presentan una fase más avanzada de investigación y diseño, y porque además éste es el refrigerante usado en las centrales nucleares españolas.

Como hemos visto antes, todas las centrales nucleares tienen en común cuatro elementos fundamentales: (1) núcleo, (2) generador de vapor, (3) turbina y (4) condensador. Los SMR también comparten estos cuatro elementos en común, sin embargo, presentan varias modificaciones respecto las centrales nucleares convencionales. Ya que tal y como hemos explicado, los SMR están contenidos en un único módulo que contiene todos estos elementos.

A continuación, vamos a realizar una clasificación de los principales desarrollos de SMR refrigerados por agua ligera.

### **2.2.1. mPower**

El reactor mPower fue propuesto por Babcock y Wilcox (B&W) en junio de 2009. Este reactor inicialmente se diseñó con una potencia de 125 MWe, aunque posteriormente esta potencia fue aumentada hasta los 180 MWe con una generación térmica de 530 MWt. A diferencia de otros diseños este reactor está diseñado para producir vapor sobrecalentado

sin la necesidad de requerir separadores antes de enviar el vapor a la turbina, lo cual supone una importante ventaja a la hora de aprovechar el espacio y de reducir costes de fabricación [11].

Otra de las principales ventajas radica en su seguridad pasiva, ya que el circuito primario de refrigeración se encuentra totalmente contenido en la vasija presurizada del reactor, con un sistema automático de despresurización. Esto permite reducir la posibilidad de fugas de refrigerante al medio ambiente en caso de accidente. El reactor además está diseñado con unas bombas de recirculación tal y como podemos ver en la Ilustración 11, sin embargo, en caso de avería o de fallo de suministro eléctrico, el refrigerante es recirculado por gravedad, de modo que el reactor siempre se mantenga refrigerado [11].



Ilustración 11. Sección transversal del reactor mPower [11].

### 2.2.2. Westinhouse SMR

El reactor de Westinhouse fue propuesto en el año 2011. Este reactor se diseñó para producir una potencia eléctrica de 225 MWe con una generación térmica de 800 MWt. El diseño de este reactor es una versión adaptada de un reactor utilizado en las centrales nucleares convencionales denominado AP1000. Al igual que en el mPower, el reactor de

Westinhouse utiliza la gravedad para inducir la circulación natural del refrigerante a través del reactor y también tiene el circuito de refrigeración primario completamente contenido dentro de la vasija del reactor. Pero la principal ventaja de este reactor radica en su tamaño, con un diámetro de la vasija del reactor de solo 9 metros, es un reactor increíblemente compacto. Esto lo hace una solución muy interesante para lugares en los que el espacio es reducido y son necesarias soluciones extremadamente compactas.

Otra de sus diferencias es la generación de vapor, este diseño incorpora un intercambiador de calor desde el refrigerante primario al secundario, mediante un intercambiador de calor de tubos. Posteriormente, la mezcla de vapor-líquido producida en el intercambiador es introducida en un separador que se encarga de generar el vapor sobrecalentado que alimentará la turbina [11].

Una observación interesante que podemos ver en la Ilustración 12, es que las paredes de la vasija son significativamente gruesas, lo cual protege el interior del reactor frente a las condiciones exteriores, al mismo tiempo que sirve de protección frente a las emisiones radiológicas emitidas por los elementos combustibles. En el Capítulo 3: Selección de materiales analizaremos los materiales que pueden ser usados como revestimiento del núcleo, enfocándonos en las características principales que deben cumplir, así como en su impacto en el medioambiente.

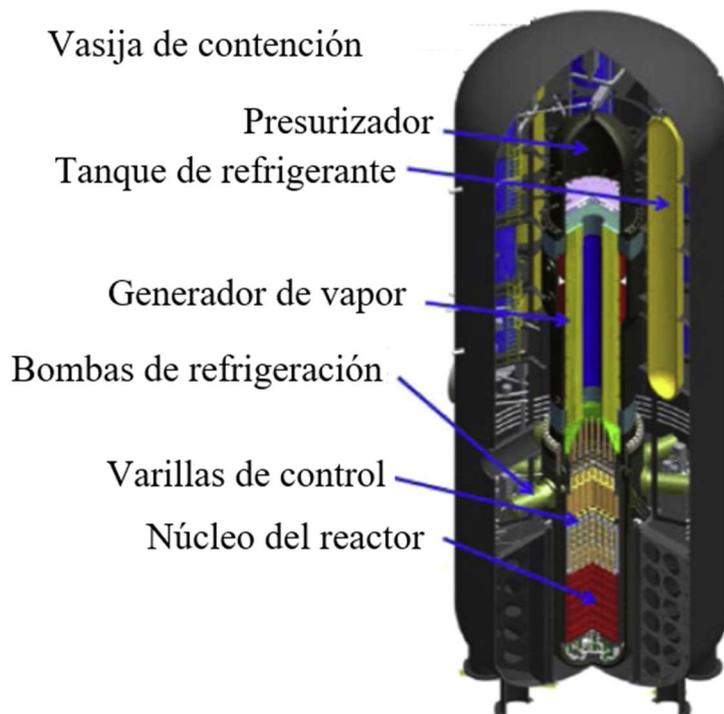


Ilustración 12. Sección transversal del reactor Westinhouse [11].

### 2.2.3. NuScale

El reactor de NuScale es un reactor de agua presurizada desarrollado en la Universidad de Oregón entre 2000-2003. Está diseñado para generar una potencia eléctrica de 45 MWe y una potencia térmica de 160 MWt. La ventaja principal de este reactor radica en su simplicidad, ya que el refrigerante circula de manera total por recirculación natural gracias a la gravedad tanto en operación, como en caso de avería, lo que hace que no incorpore bombas. Para esto, el refrigerante es calentado en el núcleo produciendo un fluido de baja densidad, este fluido se mueve hacia la parte superior del reactor a través de unos conductos. Una vez llega a la parte superior, entra en el generador de vapor, el cual es un intercambiador de calor de tipo helicoidal por el que el refrigerante caliente entra en su parte inferior, y el vapor sobrecalentado producido sale por la parte superior. Al enfriarse el refrigerante disminuye su densidad, lo que hace que retorne hacia el núcleo y repita el mismo ciclo. A diferencia de los otros modelos estudiados los cuales incorporaban bombas para mover el refrigerante en caso de avería, el reactor NuScale dispone de dos sistemas de seguridad pasiva; el decay heat removal system (DHRS) y el containment heat removal system (CHRS). Estos sistemas no requieren de energía externa para actuar, por ello, son una importante ventaja en cuanto a seguridad pasiva en relación con los demás modelos [11].

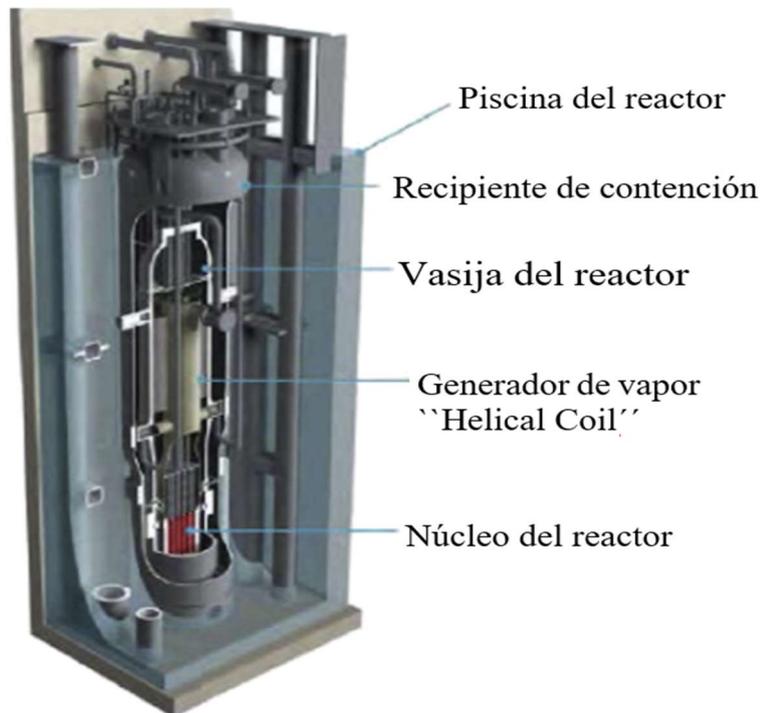


Ilustración 13. Sección transversal del reactor NuScale [11].

#### 2.2.4. Otros tipos de SMR

Además de los modelos presentados anteriormente, en la actualidad existen otros tipos de SMR en fase de desarrollo enfocados no sólo en la producción eléctrica, sino también en la gestión del ciclo de combustible o en la producción de calor industrial. Estos reactores son los reactores refrigerados por gas y los reactores refrigerados por metales líquidos [12].

##### 2.2.4.1. Reactores refrigerados por gas

La función principal de los reactores refrigerados por gas es la de producir calor requerido para procesos industriales. Este tipo de reactores utiliza gases como el helio para enfriar el núcleo del reactor, y combustible pastillas de dióxido de uranio. Utilizan grafito como moderador, y una característica destacable es que generan menos calor residual que los otros tipos de reactores, pudiendo eliminar el mismo mediante procesos pasivos. Uno de los elementos presente en este tipo de reactores es un sistema de turbo compresión tal y como se muestra en la Ilustración 14 de un SMR refrigerado por gas [12].

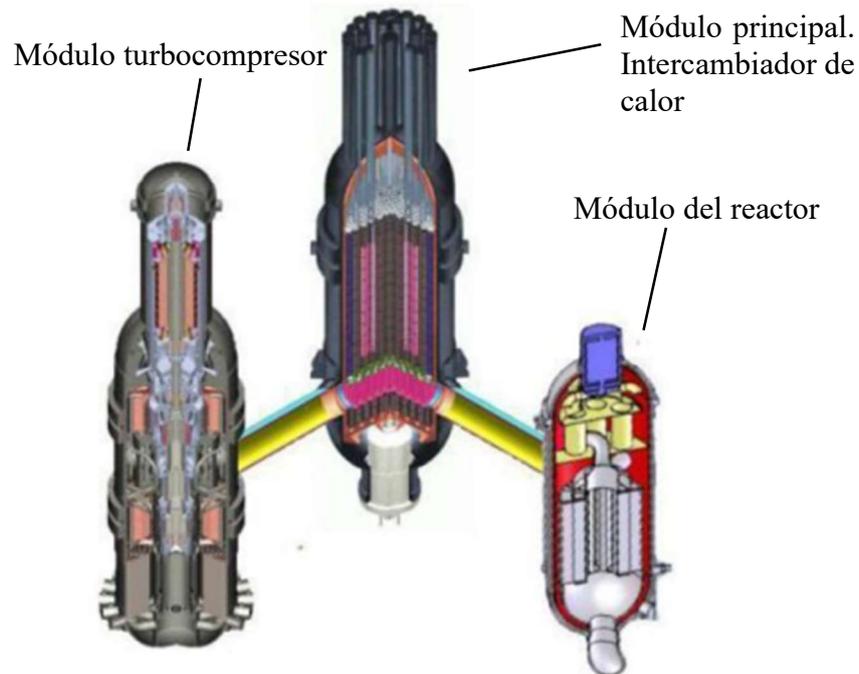


Ilustración 14. Diseño de un SMR refrigerado por gas [12].

##### 2.2.4.2. Reactores refrigerados por metales líquidos

Estos reactores han sido propuestos como solución para la gestión del ciclo de combustible. De modo que utilizan como combustible el combustible nuclear gastado de reactores convencionales. Dicho combustible permanece en el reactor un determinado periodo de tiempo, sustituyéndose cada ciertos años. A diferencia de los anteriores tipos

de reactores, estos SMR utilizan como refrigerante metales líquidos, como sales de sodio fundidas o aleaciones plomo-bismuto. Además, operan a alta temperatura, por encima de los 500°C. A continuación, se puede ver en la Ilustración 15 un diseño de un SMR refrigerado por sales de sodio [12].

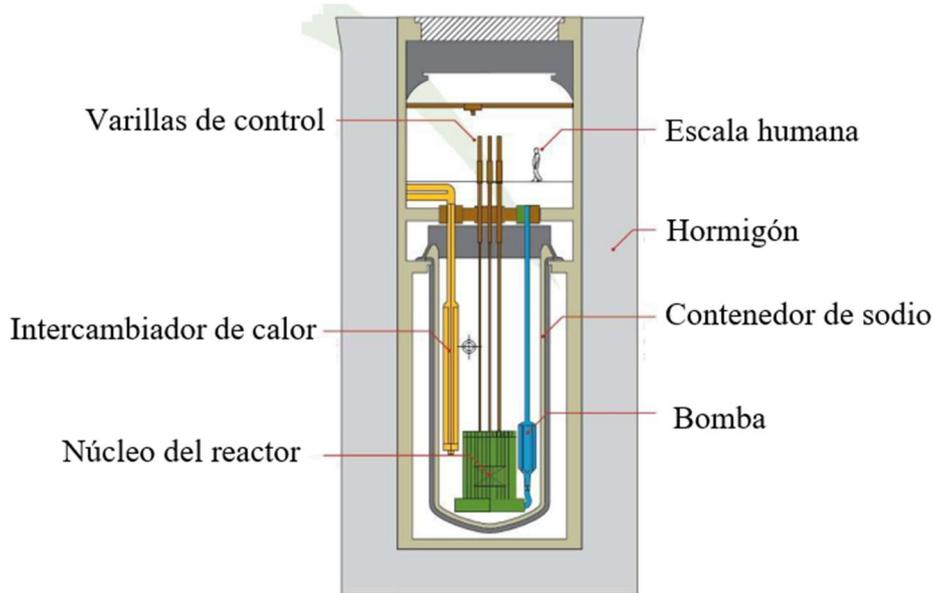


Ilustración 15. Esquema de un reactor refrigerado por sales de sodio [12].

### 2.3. Normativa aplicable a los SMR. Seguridad

A efectos prácticos los SMR son centrales nucleares en miniatura, y por lo tanto deben cumplir la estricta normativa que regula la construcción, actividad y seguridad de las instalaciones nucleares. En España, la ley que regula la energía nuclear es la Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear.

En el apartado de seguridad, existen una gran cantidad de reglamentos que se deben cumplir en las instalaciones nucleares, los más destacables son:

- El Real Decreto 1400/2018, de 23 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre seguridad nuclear en instalaciones nucleares.
- El Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.
- Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos.

### **2.3.1. Normativa. Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear**

A medida que las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear comenzaron a adquirir una importante presencia en España, surgió la necesidad de elaborar una ley que regulara el desarrollo y puesta en práctica de las instalaciones, protegiendo a las personas, cosas y medio ambiente, y así es como surgió la Ley de Energía Nuclear en España. Además de lo anterior, el segundo objetivo recogido en su artículo primero es regular los compromisos internacionales que debe cumplir el estado en relación con la energía nuclear [13].

### **2.3.2. Reglamentos de seguridad nuclear en España**

Tal y como hemos citado anteriormente, en España existen numerosos reglamentos destinados a asegurar la seguridad en las instalaciones nucleares, así como garantizar una gestión responsable de los desechos radiactivos que se generan. Vamos a citar a continuación los tres reales decretos más importantes.

#### **2.3.2.1. El Real Decreto 1400/2018, de 23 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre seguridad nuclear en instalaciones nucleares.**

Este Real Decreto fue aprobado el 23 de noviembre de 2018 por el Ministerio de Transición Ecológica. Este Decreto tiene como base la Directiva 2009/71/EURATOM de la Unión Europea y la Ley 25/1964 anteriormente explicada en este TFG. El objetivo de este reglamento es el establecimiento de los requisitos básicos de seguridad nuclear aplicables a las instalaciones nucleares durante todo su ciclo de vida, con el objetivo de garantizar un alto nivel de seguridad para proteger a los trabajadores y al público general contra los riesgos que representan las radiaciones ionizantes y mantener la seguridad nuclear promoviendo su mejora [14].

Por ello, cualquier proyecto de energía nuclear en España debe tener como base este reglamento y aplicarlo en las diferentes fases de las instalaciones: emplazamiento, diseño, construcción, montaje y entrada en servicio, explotación y desmantelamiento.

#### **2.3.2.2. El Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.**

Aprobado el 20 de diciembre de 2022 por el Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, este reglamento establece las normas básicas para la protección de la población y de los trabajadores frente a los peligros de las radiaciones ionizantes, aplicable tanto en situaciones normales como de emergencia. Además, este

reglamento incluye los procedimientos a seguir para los tres tipos de exposiciones existentes:

- Exposición planificada: Aquellas actividades que provienen del uso planificado de una fuente de radiación, ya sea natural o artificial.
- Exposición de emergencia: Aquellas situaciones que surgen de una emergencia nuclear.
- Exposición existente: Son situaciones en las que ya no se requiere la adopción de medidas urgentes, debido a que su ubicación o potencial hace injustificado su control.

#### **2.3.2.3. Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos.**

Este reglamento establece la regulación para la gestión responsable y segura de los residuos derivados de actividades nucleares, como por ejemplo el combustible nuclear al acabar su ciclo de vida. Estos materiales deben ser gestionados de manera correcta debido al peligro que suponen para la salud y el medioambiente, así como las cargas que pueden generar para nuestras generaciones futuras.

## Capítulo 3: Selección de materiales

### 3.1. Propiedades más relevantes de los materiales en los SMR

Antes de comenzar con el estudio de los materiales que se van a utilizar en el diseño de los SMR, es muy oportuno realizar un listado de las propiedades más importantes de los materiales en los SMR.

#### 3.1.1. Precio

En primer lugar, y una de las propiedades más importantes hoy en día a la hora de elegir un material para cualquier proyecto, es el precio de dicho material, ya que la rentabilidad de la inversión va a depender en gran medida del coste de los materiales.

A continuación, se muestra una gráfica con la relación precio/familia de material, con la que se pretende dar una idea general de los diferentes materiales que podemos encontrar en un SMR y cuáles tienen el mayor impacto en el precio final.

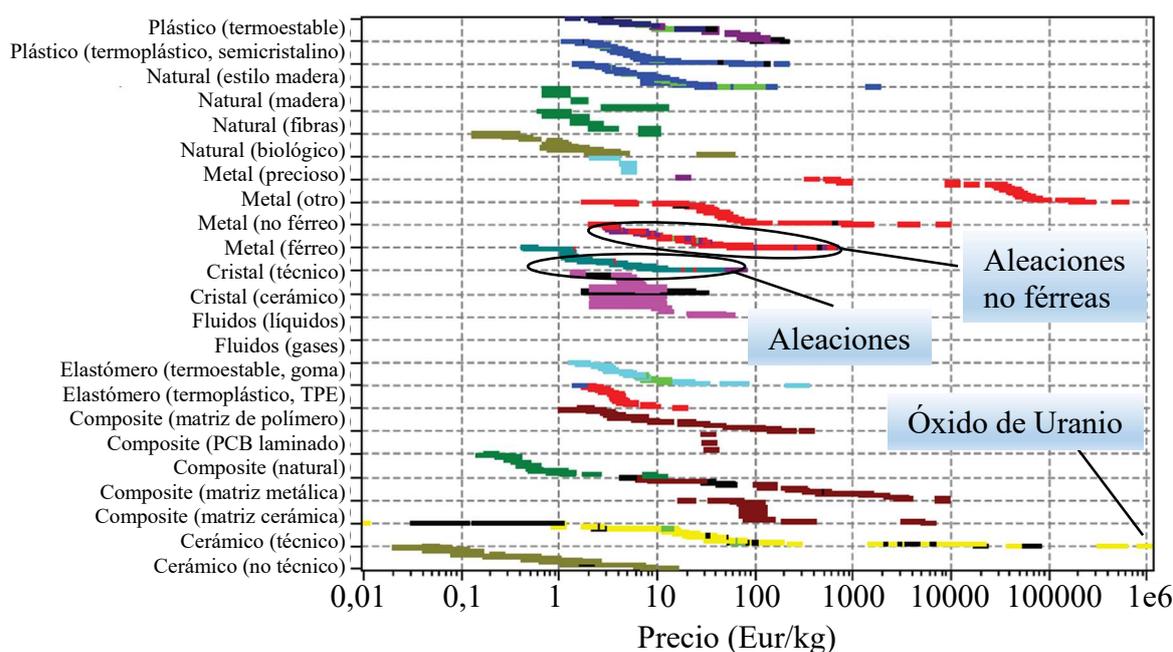


Ilustración 16. Relación entre el precio y la familia de material.

Tal y como podemos ver en la gráfica, el precio de un material va a depender en gran medida de la clase a la que pertenece. Dentro de la familia de las aleaciones, las opciones más baratas son los aceros de baja aleación, usados como material estructural o en piezas que no requieren especificaciones especiales. Al aumentar el precio, se encuentran los aceros inoxidables, los cuales son usados como material de fabricación de tuberías, piezas del interior del reactor, u otros materiales que requieren una alta resistencia a la corrosión

o al desgaste. Por último, las aleaciones que presentan un precio más elevado son las aleaciones inoxidables austeníticas, las cuales se emplean en elementos del reactor que van a estar sometidos a una alta temperatura y un medio corrosivo, y requieren una resistencia especial para estas condiciones.

Otra familia de materiales de igual interés son las aleaciones no férreas, dentro de este grupo de materiales los que presentan un menor precio es el aluminio y sus aleaciones derivadas, las cuales son usadas como materiales estructurales. Por otro lado, los que presentan un precio más elevado son las aleaciones de zirconio-niobio, utilizadas como recubrimiento de las barras de combustible nuclear, o la aleación de titanio, empleada en elementos estructurales internos del reactor.

En la gráfica también se señala el óxido de uranio ( $U_2O$ ), el cual se usa como combustible en la mayoría de las centrales nucleares del mundo y el cual presenta la relación precio/peso más elevada de los materiales tenidos en cuenta.

### **3.1.2. Temperatura máxima de servicio**

En ingeniería, se define la temperatura máxima de servicio de un material como la temperatura a la que puede usarse un material sin que sufra oxidación, cambios químicos o deformación por fluencia. Esta propiedad es sumamente importante en el diseño de los reactores nucleares, ya que como hemos comentado anteriormente, en el núcleo del reactor se alcanzan temperaturas muy elevadas, y a pesar de estar continuamente refrigerado, los materiales que lo componen deben tener una alta temperatura de servicio. A continuación, se muestra una gráfica que relaciona la temperatura máxima de servicio y la familia del material.

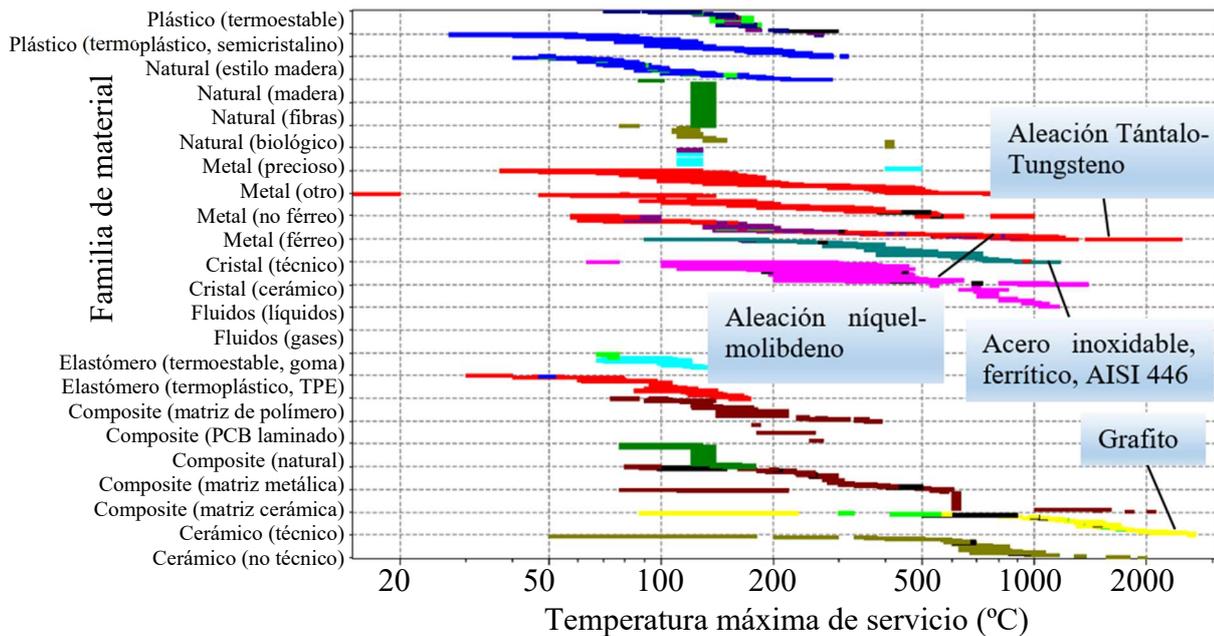


Ilustración 17. Relación entre la temperatura máxima de servicio y la familia de material.

En esta gráfica también se han señalado algunos de los materiales utilizados en los reactores nucleares y que están expuestos a una temperatura de servicio elevada. Algunos de estos materiales son: el grafito, usado como moderador en el núcleo del reactor o la aleación níquel-molibdeno, usada como material de las tuberías. Otros materiales también expuestos a temperaturas de servicio elevadas son, por ejemplo, la aleación tántalo-tungsteno, utilizada para los contenedores de sales de metal fundido, o el acero inoxidable AISI 446, utilizado como material de la vasija de contención del reactor. De los anteriores materiales mencionados, a la hora de la selección prestaremos especial atención a aquellos que están expuestos a unas temperaturas de servicio más elevadas, estos materiales serán los que se encuentren en el núcleo del reactor, cuanto más cerca de los elementos combustibles, mayor será la temperatura a la que estarán expuestos, por ejemplo, el material que recubre el exterior de los tubos donde se aloja el combustible nuclear.

En este apartado, también se podrían englobar otras propiedades importantes como el punto de fusión o la conductividad térmica, sin embargo, es la temperatura máxima de servicio la propiedad térmica más determinante e influyente de la mayoría de los materiales.

### 3.1.3. Durabilidad

#### Agua

En los reactores nucleares, una gran cantidad de los elementos se encuentran en contacto

con agua, ya que esta se usa bien para refrigerar el reactor llenándolo casi completamente, o bien como moderador para frenar los neutrones. Por lo tanto, tanto los materiales del núcleo, como los materiales de las tuberías y canalizaciones deben tener una buena resistencia al contacto con el agua, para evitar su oxidación. En la Tabla 2 se muestra el número de materiales de cada familia en función de su resistencia al agua:

Como podemos ver, los metales son la familia de materiales que presentan un grado de resistencia al agua más elevado, por lo tanto, junto con las anteriores propiedades térmicas comentadas, serán estos materiales los que serán seleccionados para aquellos elementos que están permanentemente en contacto con el agua. Por ejemplo, las tuberías del circuito de refrigeración del reactor están fabricadas de aleaciones inoxidables debido a su excelente resistencia a la oxidación, mientras que si estuvieran fabricadas en acero al carbono o un acero de baja aleación esta resistencia no sería tan elevada y podría presentar problemas como fugas. Otro ejemplo de material destacable es el grafito, el cual es usado para fabricar las barras de control de los reactores de alta temperatura, presentando una excelente resistencia tanto al agua como a las altas temperaturas, además de su absorción neutrónica, por lo que no sería posible fabricar estas barras de otro material sin verse afectadas considerablemente sus propiedades.

Tabla 2. Distribución del número de materiales por familia en función de su resistencia al agua.

Familia de material	Resistencia al agua			
	Inaceptable	Uso limitado	Aceptable	Excelente
Plástico (termoestable)	0	6	11	127
Plástico (termoplástico, semicristalino)	0	2	99	334
Natural (estilo madera)	0	2	25	242
Natural (madera)	0	5	2	0
Natural (fibras)	0	440	0	0
Natural (biológico)	0	0	11	3
Metal (precioso)	0	0	1	4
Metal (otro)	0	0	0	125
Metal (no férreo)	7	26	19	15
Metal (férreo)	0	0	8	1000
Cristal (técnico)	0	0	478	256
Cristal (cerámico)	0	3	12	37
Fluidos (líquidos)	0	0	0	11
Fluidos (gases)	0	0	0	0
Elastómero (termoestable, goma)	0	0	0	0
Elastómero (termoplástico, TPE)	0	2	7	49
Composite (matriz de polímero)	0	0	4	71
Composite (PCB laminado)	0	0	19	68
Composite (natural)	0	0	3	0
Composite (matriz metálica)	7	52	4	0
Composite (matriz cerámica)	0	0	5	109
Cerámico (técnico)	0	0	0	79
Cerámico (no técnico)	2	1	10	182
	2	0	2	39

### Oxidación 500°C

Cuando un material se calienta, aumenta la tendencia a la oxidación, debido a que

aumenta la difusión de oxígeno desde el medio al material afectado. Este aumento de la temperatura, junto con la presencia de agua, puede provocar problemas en ciertas partes del reactor. Por ello, deben seleccionarse materiales con una alta resistencia a la oxidación por aumento de temperatura, como aleaciones con un alto contenido en cromo, el cual forma una capa protectora que protege al material. En la Ilustración 18 se muestra el contenido en cromo de las aleaciones de acero inoxidable:

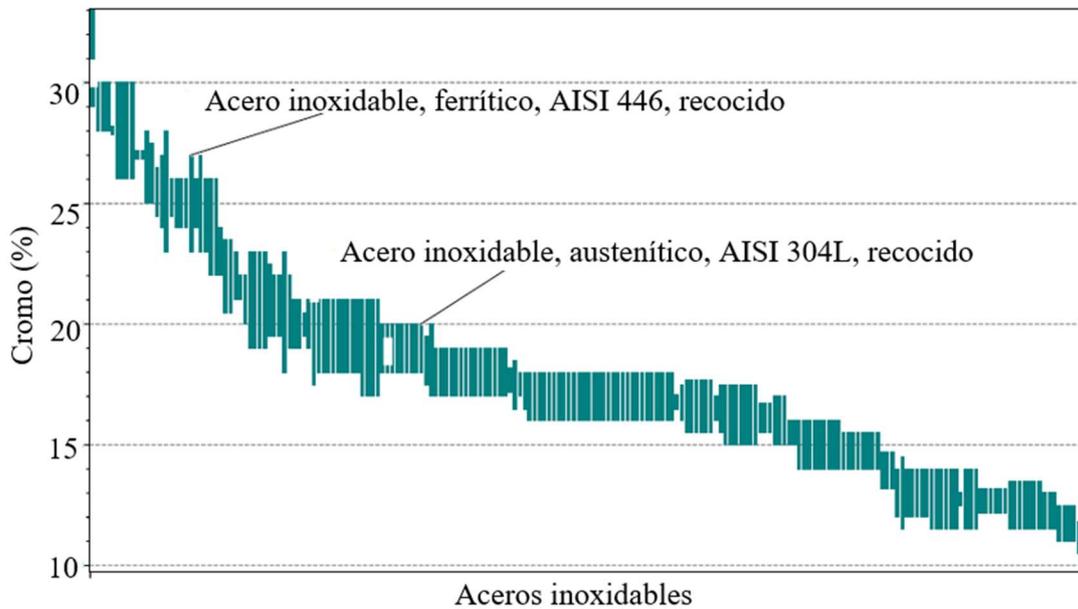


Ilustración 18. Porcentaje de cromo en los aceros inoxidables.

En la gráfica anterior, se han seleccionado dos de los aceros más utilizados en la industria nuclear, el acero inoxidable AISI 304 y el acero inoxidable AISI 446. Ambos presentan unas características similares en cuanto a resistencia a la corrosión, representadas en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3. Resistencia a la corrosión AISI 304 y AISI 446.

Tipo de corrosión	AISI 304	AISI 446
Número equivalente de resistencia a las picaduras (PREN)	19,6 – 22.6	23 – 31
Picadura y hendidura	Media (20-30)	Media (20-30)
Corrosión bajo tensión	Levemente susceptible	No susceptible
Resistencia a la corrosión intergranular	Buena	Buena
Ácidos inorgánicos	Moderada	Restringida
Ácidos orgánicos	Buena	Restringida
Alcalinos	Moderada	Moderada
Humedad y agua	Excelente	Excelente
Agua marina	Restringida	Buena
Aceite y gases	Pobre	Restringida

### 3.1.4. Huella de carbono

En nuestra sociedad actual, cada vez se implementan más medidas para favorecer la descarbonización de la industria, con el objetivo de alcanzar un modelo industrial más sostenible para el medio ambiente. Por lo tanto, una de las propiedades más importantes hoy en día es el impacto de la huella de carbono que resulta de la fabricación de un material. Tal y como podemos ver en la siguiente gráfica, la producción de los materiales más empleados en los reactores nucleares relativamente menor que en comparación con la producción de otros tipos de aleaciones o materiales:

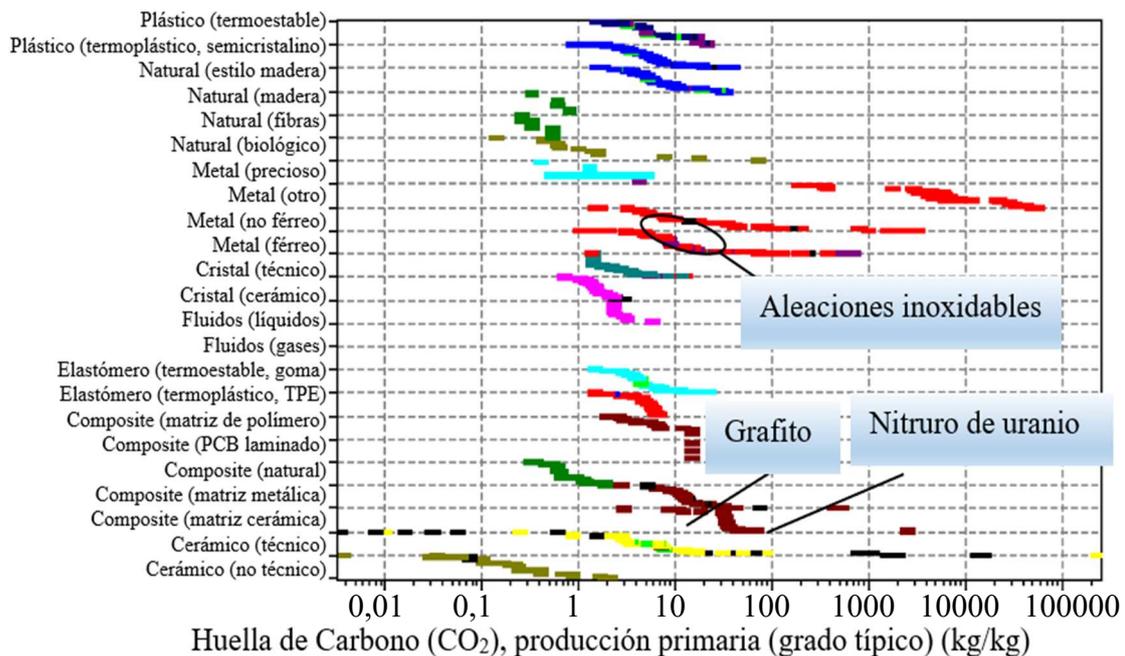


Ilustración 19. Impacto de la huella de carbono en función del tipo de fabricación.

En la anterior ilustración se han señalado algunos materiales importantes, como el grafito y las aleaciones, o el Nitruro de uranio, usado como combustible nuclear en los reactores refrigerados por metal líquido (LMCR).

### 3.1.5. Uso de agua

Al igual que la huella de carbono, la escasez de agua es un problema que cada vez está más presente en nuestra sociedad. Por ello, un factor muy importante en los procesos de fabricación es el uso de agua. En la Ilustración 20 se recoge la cantidad de agua necesaria para producir diversos tipos de materiales.

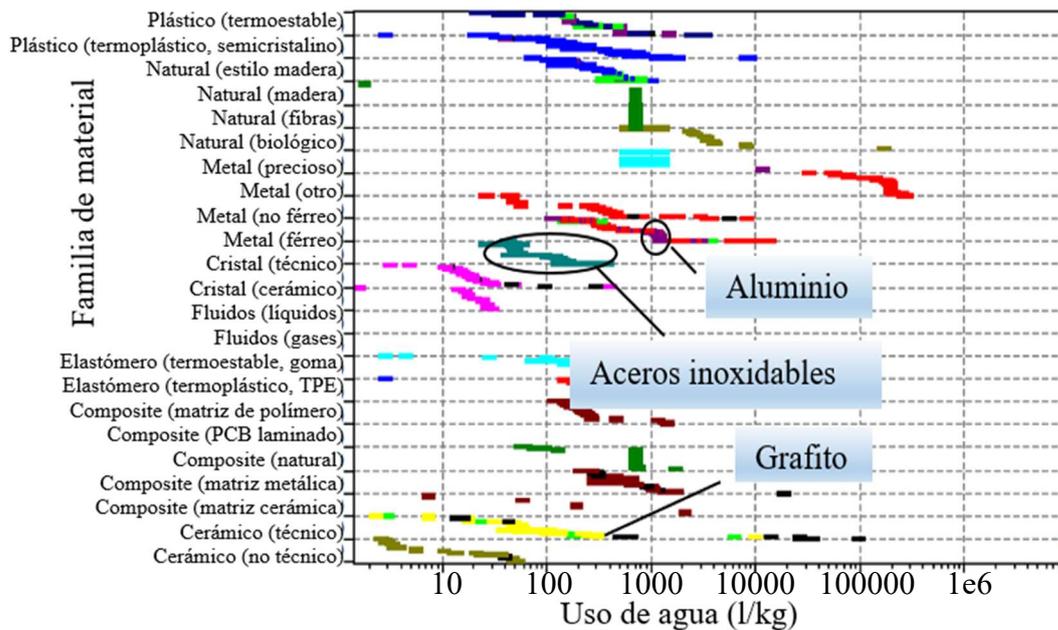


Ilustración 20. Uso de agua en función de la familia de material.

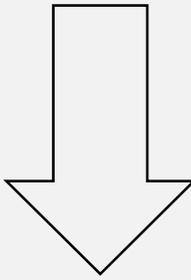
Como podemos ver que los materiales típicos de los SMR presentan un uso de agua menor al de otros tipos de materiales, por ejemplo, los aceros inoxidables, los cuales representan un porcentaje muy elevado del total de materiales, presentan un uso de agua menor al del grafito o el aluminio.

### 3.1.6. Fin de vida y reciclabilidad

Cuando un reactor nuclear termina su ciclo de vida, hay una gran cantidad de materiales que requieren un desmantelamiento y un plan de reciclabilidad especializado para cada tipo de material, ya que algunos estarán irradiados y serán peligrosos para los animales y el medio ambiente, debiendo guardar estos en lugares especializados para ello. Otros aún conservarán parte de sus características originales y podrán ser reutilizados o adaptados en otros emplazamientos o aplicaciones, como el hormigón de reciclado o los elementos electrónicos del reactor. Y por último, algunos no podrán ser reutilizados y deberán ser eliminados o desechados en vertederos.

La Tabla 4 recoge las opciones en el final de vida de un material:

Tabla 4. Resumen de opciones de fin de vida de los materiales.

Opción al final de vida	Descripción	Impacto medioambiental
Extensión de uso	Extensión de vida de un material	<p style="text-align: center;">Menor</p>  <p style="text-align: center;">Mayor</p>
Re-Ingeniería	Adaptación de un material a otro proceso previo rediseño	
Reciclado	Reprocesado del material para su nueva utilización	
Downcycle	Reprocesado del material original a otro de menor grado de calidad	
Quemado	Recuperación de la energía térmica del material mediante su combustión	
Vertedero	Deposición del material	

### Biodegradación

La biodegradación consiste en la descomposición de los materiales por medios naturales, por ejemplo, bacterias, hongos o insectos. La mayoría de los materiales biodegradables suelen presentar un alto contenido en compuestos orgánicos en carbono, estos compuestos complejos son los que se degradan en compuestos más simples. Algunos ejemplos de distintos materiales biodegradables son: desechos de animales y plantas, cartón y papel, algunos plásticos o la madera. Por lo tanto, podemos intuir que en un reactor nuclear la mayoría de los materiales no van a ser biodegradables al ser del tipo aleaciones, cerámicas o metales.

### Extensión de uso / Reciclado / Downcycle

Algunos materiales, al ser desmantelados, aún conservan sus propiedades originales y no necesitan ser reciclados o tratados, si no que pueden ser usados directamente en otro proceso requerido. A este tipo de reciclaje se le conoce como extensión de vida del material. Esta extensión dependerá del estado del material a la hora de proceder a su desmantelamiento y del uso que se le quiere dar una vez se ha retirado. Aquellos materiales que han sufrido un mayor desgaste o que no van a su uso de vida no puede ser extendido, se les realiza un reciclado, transformando estos materiales en materias primas o en otros productos para su posterior uso, por ejemplo, los aceros del reactor que no han sido irradiados pueden ser utilizados como chatarra y ser fundidos para producir nuevos lingotes de este material. Por otro lado, el downcycle consiste en el reprocesado de un material en otro de menor calidad o de peores características.

## Combustión / Vertedero

Cuando un material no puede ser reciclado por ninguno de los anteriores medios descritos, existen dos opciones de eliminación de ese material. En primer lugar, se puede usar el material como combustible, para así recuperar su energía térmica y por ejemplo producir electricidad. Si el material no puede ser quemado, se procede a su deposición en un vertedero, sin embargo, muchos materiales no pueden ser desechados en vertederos comunes y necesitan de almacenajes especializados, por ejemplo, los desechos radiactivos del núcleo del reactor.

### 3.1.7. Energía contenida

La energía contenida de un material durante su procesado es la energía necesaria para producir 1kg de ese material. Debido a la gran cantidad de toneladas que forman los SMR, este dato es sumamente importante para conocer el coste de los materiales. A continuación, podemos ver la Ilustración 21 que relaciona la energía contenida de procesado en función de la familia de material.

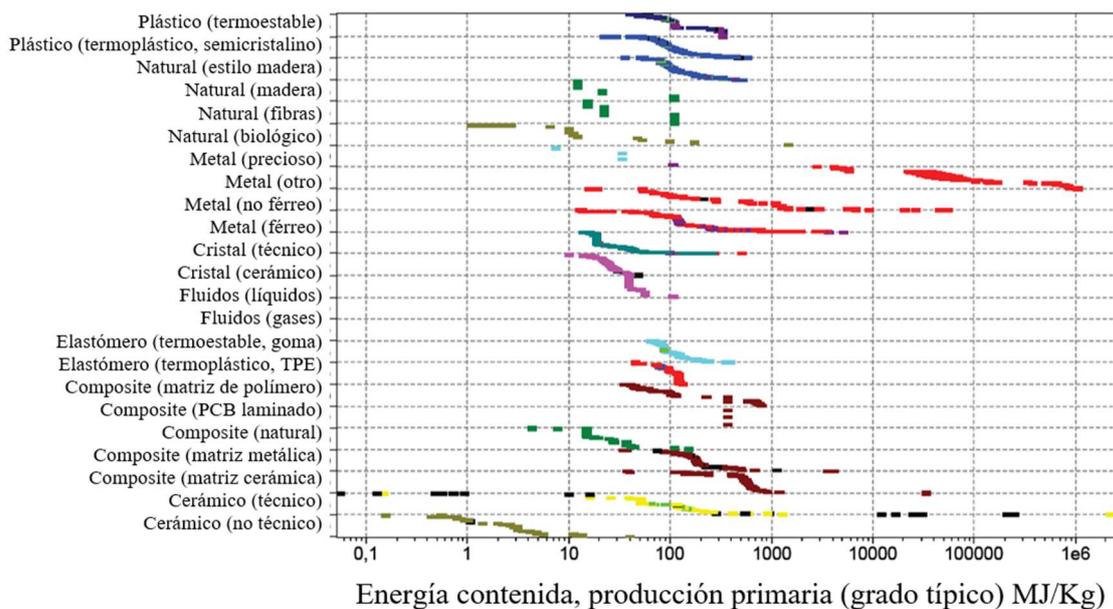


Ilustración 21. Relación entre la energía contenida en función de la familia de material.

Como podemos ver, esta gráfica sigue una distribución muy parecida a la del precio de los materiales y la huella de carbono. Además, con este dato podemos determinar el período de tiempo en el que se amortiza la inversión realizada en los materiales del reactor.

## **3.2. Estudio de los materiales**

Una vez que ya conocemos las propiedades más importantes que debemos tener en cuenta a la hora de realizar nuestro estudio de materiales, podemos proceder con el mismo. Este estudio de materiales se va a dividir por elementos del reactor.

### **3.2.1. Vasija de contención**

El primer elemento que vamos a analizar es la vasija de contención del reactor, tal y como hemos visto anteriormente, en los SMR esta vasija es la encargada de mantener todos los elementos en su interior, además, se encarga de mantener presurizado el reactor y de evitar que la radiación escape fuera de él. Vamos a analizar la vasija de contención desde fuera hacia adentro.

#### **3.2.1.1. Revestimiento exterior**

Generalmente, el exterior de la vasija de contención está recubierta de hormigón. El hormigón es el elemento más usado en construcción del mundo y se forma mezclando cemento, arena, grava y agua. Las características más importantes del hormigón son su resistencia a la compresión, su dureza y su reducido precio. Sin embargo, el hormigón de los reactores nucleares debe cumplir además con unos requisitos muy específicos para su aplicación.

1. Alta densidad: El hormigón que se usa en las centrales nucleares debe tener una densidad más alta que el hormigón convencional, esto sirve para evitar fugas de radiación del interior.
2. Bajo contenido en agua: Debido a que el hormigón contiene agua, en caso de un accidente nuclear se podría generar vapor que, al quedar atrapado en la vasija del reactor, podría generar una explosión. Por esto, el hormigón de los reactores nucleares se produce con una cantidad controlada de agua.
3. Resistencia a la radiación: El hormigón de los reactores nucleares está formulado específicamente para resistir los efectos de las radiaciones ionizantes sin perder sus propiedades.
4. Alta resistencia mecánica: Los reactores nucleares son objetivos militares en caso de un conflicto armado, por lo tanto, el hormigón que recubre el reactor se formula para que sea capaz de soportar ataques militares.

De entre los distintos tipos de hormigón, he elegido para este estudio el hormigón de alta densidad. Su composición se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Composición del hormigón de alta densidad.

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (alúmina)	0,36 %
C (Carbono)	0,15 %
CaO (Calcita)	5,17 %
Fe (Hierro)	50,3 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de hierro)	0,26 %
H <sub>2</sub> O (Agua)	4,61 %
MgO (Óxido de magnesio)	0,2 %
Mn (Manganeso)	0,38 %
P (Fósforo)	0,01 %
S (Azufre)	0,01 %
SiO <sub>2</sub> (Dióxido de silicio)	38,2 %
Otros óxidos	0,29 %

La densidad de este hormigón es de  $(4,9-5,5) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  frente a los  $(2,2-2,6) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  que caracteriza al hormigón convencional con cemento Portland. Esta alta densidad lo hace una barrera pasiva perfecta frente a la radiación que se genera en el interior del reactor. Además, le confiere unas propiedades muy características, como podemos ver a continuación:

En primer lugar, vamos a comenzar analizando el módulo de Young. El hormigón armado de alta densidad presenta un módulo de Young mayor que el del hormigón convencional (tabla 3). Este elevado módulo de Young permite que el hormigón de alta densidad sea capaz de soportar mayores esfuerzos sin sufrir deformaciones.

Tabla 6. Módulo de Young del hormigón convencional y de alta densidad.

	<b>Módulo de Young</b>
<b>Hormigón convencional</b>	15-25 GPa
<b>Hormigón de alta densidad</b>	40,2-41,6 GPa

Otra de sus características destacables es su temperatura de servicio, llegando hasta los 857°C, siendo esta una propiedad muy importante debido a las altas temperaturas que alcanza el interior del reactor.

Sin embargo, este material también presenta ciertas desventajas que debemos tener en cuenta, empezando por su precio. Debido a sus requeridas características y a su estricto proceso de control de calidad, su precio es significativamente más elevado que el del hormigón convencional (Tabla 4).

Tabla 7. Precio hormigón convencional y de alta densidad.

	<b>Precio</b>
<b>Hormigón convencional</b>	0,04-0,06 €/kg
<b>Hormigón de alta densidad</b>	0,25-0,31 €/kg

Para analizar la sostenibilidad, en primer lugar, vamos a presentar los datos de producción.

Tabla 8. Energía contenida y huella de carbono en la producción del hormigón de alta densidad.

<b>Energía contenida</b>	0,923 – 1,02 MJ/kg
<b>Huella de carbono</b>	0,113 – 0,125 kg/kg

Así como los de reciclabilidad.

Tabla 9. Reciclabilidad del hormigón de alta densidad.

<b>Reciclado</b>	Sí
<b>Energía contenida, reciclado</b>	0,758 – 0,838 MJ/kg
<b>Huella de CO<sub>2</sub>, reciclado</b>	0,0631 – 0,0698 kg/kg
<b>Porcentaje de material reciclado en el mundo respecto del total</b>	13 – 14,4 %
<b>Downcycle</b>	Sí
<b>Combustión</b>	No
<b>Vertedero</b>	Sí
<b>Biodegradación</b>	No

Una vez que el hormigón llega al final de su vida útil, puede ser reciclado mediante un proceso que consiste en romperlo, eliminar los materiales no deseados como el acero o la suciedad contenida, y triturarlo hasta obtener las propiedades deseadas. Este proceso puede realizarse tanto in situ como en una cantera y el hormigón obtenido se denomina hormigón de reciclado.

Otro problema que podemos ver en las anteriores tablas es su elevada huella de carbono, sobre todo durante su producción. Esto es debido al componente principal del hormigón, el cemento. Durante el proceso de obtención del cemento, tienen lugar una serie de reacciones químicas que producen una gran cantidad de CO<sub>2</sub> como desecho [15].

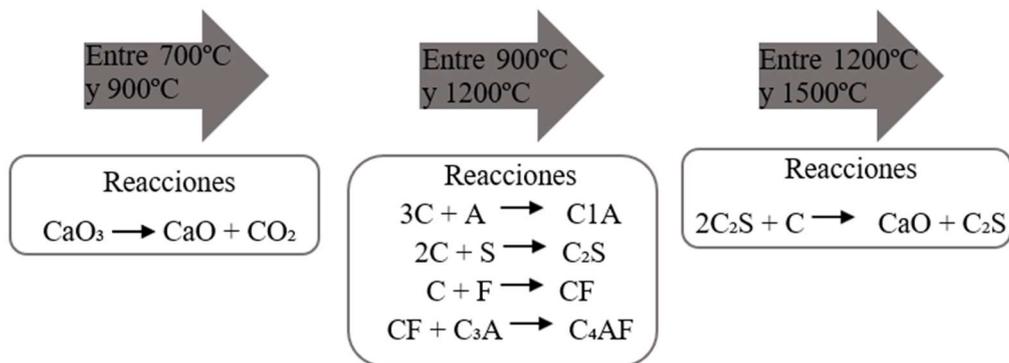


Ilustración 22. Reacciones químicas en la obtención del Clíinker [15].

Una de las principales alternativas es el uso de hormigón basado en geopolímeros. Este tipo de hormigón, en lugar de usar cemento convencional, emplea cenizas de altos hornos, desechos del refinado del petróleo, cenizas de la metalurgia, etc. Estos residuos se mezclan con un activador alcalino (sal alcalina, alcalinos cáusticos) y agua. El resultado es un hormigón con un 40-80% menos de huella de carbono y que podría presentar una mejorada resistencia al calor, menor porosidad y mayor resistencia a la fractura. A continuación, podemos ver en la Tabla 10 una comparativa con las características principales del hormigón basado en geopolímeros y del hormigón de alta densidad.

Tabla 10. Comparativa hormigón basado en geopolímeros y hormigón de alta densidad.

	<b>Hormigón basado en geopolímeros</b>	<b>Hormigón de alta densidad</b>
<b>Densidad</b>	$(2,1-2,3) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$(4,9-5,5) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo de Young</b>	10 – 35 GPa	40,2 – 41,6 GPa
<b>Temperatura máxima de servicio</b>	480 – 510 °C	627 – 857 °C
<b>Energía contenida (producción primaria)</b>	0,752 - 0,832 MJ/kg	0,923 - 1,02 MJ/kg
<b>Huella de carbono (producción primaria)</b>	0,0613 - 0,0674 kg/kg	0,113 - 0,125 kg/kg

Aunque aún son necesarios más estudios sobre este nuevo material y las propiedades que es capaz de prestar, se posiciona como una opción muy prometedora en la construcción de los SMR y en la reducción de la huella de carbono en la industria.



Ilustración 23. Ejemplos de hormigón basado en geopolímeros en obra.

### 3.2.1.2. Revestimiento interior

Tras el revestimiento exterior de hormigón, el siguiente componente es la vasija de acero del reactor. Este componente, tal y como hemos visto anteriormente, es el recipiente presurizado en el que se encuentran todos los elementos del reactor. [16]



Ilustración 24. Vasija del reactor modular NuScale [16].

Como podemos ver en la Ilustración 24, este recipiente debe tener la suficiente resistencia como para aguantar las altas presiones de su interior, también debe ser capaz de resistir a la corrosión y las altas temperaturas al estar en contacto permanente con el refrigerante y

las partes calientes del reactor, además de todo esto, debe presentar una buena resistencia frente a la radiación que se genera en su núcleo.

Aunque en este apartado no existe una única opción de material que cumpla con las anteriores características, ya que su elección dependerá del diseño del reactor, todas las opciones utilizadas actualmente tanto en reactores convencionales como en diseños de SMR son aleaciones metálicas. Vamos a analizar a continuación las aleaciones más destacables en el diseño de los SMR.

### **Acero inoxidable AISI 304**

El acero inoxidable AISI 304, obtenido por recocido, es uno de los aceros más empleados hoy en día en la industria nuclear, es utilizado como material del encamisado del reactor, en componentes internos y en depósitos de combustible gastado. Su estructura interna es austenítica y presenta un elevado contenido en cromo y níquel. A continuación, podemos ver en la Tabla 11 su composición:

Tabla 11. Composición del acero inoxidable AISI 304.

C (carbono)	0 – 0,03 %
Cr (cromo)	18 – 20 %
Fe (hierro)	65 – 73,9 %
Mn (manganeso)	0 – 2 %
N (nitrógeno)	0,1 – 0,16 %
Ni (níquel)	8 – 12 %
P (fósforo)	0 – 0,045 %
S (sulfuro)	0 – 0,03 %
Si (silicio)	0 – 0,75%

El contenido en cromo y níquel en la aleación puede variar dependiendo de las características de la instalación, pero en general, esta composición será en torno al 18% para el cromo y el 8% para el níquel. Su estructura interna es austenítica, lo que le confiere propiedades como ser no magnético y no endurecible por tratamiento térmico. A continuación, podemos ver en la Tabla 12 sus propiedades principales.

Tabla 12. Propiedades principales del acero inoxidable AISI 304.

<b>Precio</b>	4,01 – 6,41 €/kg
<b>Módulo de Young</b>	195 – 205 GPa
<b>Límite elástico</b>	270 – 290 MPa
<b>Límite de ruptura</b>	270 – 290 MPa
<b>Tenacidad</b>	14,8 – 24,1 KJ/m <sup>2</sup>
<b>Temperatura máxima de servicio</b>	750 – 925 °C
<b>Coefficiente de expansión</b>	16,5 - 17,5 $\mu$ strain/°C
<b>Resistencia a la corrosión</b>	Excelente
<b>Energía contenida (prod. primaria)</b>	59,3 – 65,3 MJ/kg
<b>Huella de carbono (prod. primaria)</b>	4,19 – 4,62 kg/kg

Como podemos ver, este material presenta una excelente resistencia a la corrosión, tenacidad y ductilidad. Por el contrario, su precio es significativamente más elevado que el de los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos. También presenta un elevado coeficiente de expansión térmica y un bajo límite elástico.

Tabla 13. Reciclabilidad del acero inoxidable AISI 304.

<b>Reciclado</b>	Sí
<b>Energía contenida, reciclado</b>	13,3 – 014,7 MJ/kg
<b>Huella de CO<sub>2</sub>, reciclado</b>	1 – 1,16 kg/kg
<b>Porcentaje de material reciclado en el mundo respecto del total</b>	49,4 – 54,6 %
<b>Downcycle</b>	Sí
<b>Combustión</b>	No
<b>Vertedero</b>	Sí
<b>Biodegradación</b>	No

El principal problema en el reciclaje de esta aleación es su elevada energía contenida e impacto en la huella de carbono. Sin embargo, dado que los SMR tienen tanto un tamaño como un número de componentes considerablemente menor que los reactores convencionales, el impacto en la huella de carbono de los materiales que conforman el reactor será menor en su reciclado.

Por otro lado, dado que los aceros con estructura interna austenítica presentan unas características similares todos ellos en cuanto a propiedades, precio y reciclabilidad, existe un amplio abanico de opciones a la hora de seleccionar el más adecuado. A continuación, podemos ver en la Tabla 24 una comparativa con diferentes alternativas de aleaciones de aceros inoxidable austeníticos y sus propiedades.

Tabla 14. Comparativa propiedades acero AISI 201 y AISI 329.

	<b>Acero inoxidable AISI 201</b>	<b>Acero inoxidable AISI 329</b>
<b>Precio</b>	2,86 – 4,49 €/kg	6,74 – 8,76 €/kg
<b>Módulo de Young</b>	193 – 201 GPa	189 – 204 GPa
<b>Límite elástico</b>	275 – 350 MPa	500 – 600 MPa
<b>Límite de ruptura</b>	275 – 515 MPa	500 - 600 MPa
<b>Tenacidad</b>	18,5 – 28,3 KJ/m <sup>2</sup>	26,7 – 59,3 KJ/m <sup>2</sup>
<b>Temperatura máxima de servicio</b>	795 – 1450 °C	740 – 787 °C
<b>Coefficiente de expansión</b>	15 - 18 $\mu$ strain/°C	12 – 13,5 $\mu$ strain/°C
<b>Resistencia a la corrosión</b>	Excelente	Excelente
<b>Energía contenida (producción primaria)</b>	54,9 – 58,5 MJ/kg	54,9 – 60,5 MJ/kg
<b>Huella de carbono (producción primaria)</b>	4,78 – 5,27 kg/kg	5 – 5,51 kg/kg

Estas dos alternativas presentan unas características muy similares al acero AISI 304, sin embargo, ambas presentan un mayor impacto en la huella de carbono, además, la aleación AISI 329 también presenta un precio más elevado las otras dos opciones.

En base a lo anterior, por características, precio y sostenibilidad, es el AISI 304 el material más indicado para fabricar la vasija de contención en los SMR.

### **3.2.2. Componentes internos**

En el interior de la vasija de contención, se encuentran los elementos internos del SMR. El número y el tipo de estos elementos varía en función del diseño del reactor, por lo que podemos realizar un estudio de los materiales internos comunes a todos los tipos de SMR.

#### **3.2.2.1. Barras de control**

Tal y como hemos visto anteriormente, las barras de control son un elemento de seguridad del reactor, encargadas de controlar o parar las reacciones de fisión y por lo tanto detener el reactor. Estas varillas se encuentran en el núcleo del reactor, entre las varillas de combustible, por lo que están expuestas a una elevada radiactividad y unas altas temperaturas. El material de las varillas de control debe ser capaz de resistir las anteriores condiciones, y su característica más importante es que debe ser capaz de absorber los neutrones procedentes de las reacciones de fisión. A continuación, vamos a seleccionar los materiales más adecuados.

## Hafnio

El hafnio es uno de los materiales con mayor capacidad de absorción neutrónica, unas 600 veces mayor que el circonio. Presenta una elevada resistencia térmica, mecánica y química, lo que lo hace un material idóneo para las barras de control. El principal problema a la hora de obtener este elemento es que, en su estado natural, presenta grandes concentraciones de circonio, el circonio presenta una baja absorción neutrónica, por lo que para fabricar las varillas de control es necesario separarlo casi por completo del hafnio [17]. A continuación, se muestran en la Tabla 15 las propiedades principales del hafnio.

Tabla 15. Propiedades principales del hafnio.

<b>Composición</b>	97 – 100 %
<b>Precio</b>	818 €/kg
<b>Densidad</b>	$1,31 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo de Young</b>	138 – 144 GPa
<b>Punto de fusión</b>	2222 °C

A continuación, vamos a mostrar en la Tabla 16 sus propiedades de producción y reciclaje.

Tabla 16. Producción y reciclabilidad del hafnio.

<b>Energía contenida (producción primaria)</b>	$(1,05-1,16) \times 10^3 \text{ MJ/kg}$
<b>Huella de carbono (producción primaria)</b>	69,8 - 77 kg/kg
<b>Energía contenida (reciclaje)</b>	119 - 131 MJ/kg
<b>Huella de carbono (reciclaje)</b>	9,32 - 10,3 kg/kg
<b>Reciclable</b>	Sí
<b>Downcycle</b>	Sí
<b>Vertedero</b>	Sí

Podemos ver que uno de los principales problemas del hafnio es su elevado precio, debido a que es muy difícil de separar este compuesto del circonio. Además, también se trata de un material con una elevadísima energía contenida y un gran impacto en la huella de carbono, por lo que su uso debe estar estrictamente regulado o buscar alternativas como las que vamos a ver a continuación.

## Carburo de boro

El carburo de boro es otro de los elementos utilizados para la fabricación de barras de control en los reactores nucleares. Presenta unas propiedades muy parecidas a las del

hafnio, con una mayor capacidad de absorción neutrónica, una alta temperatura de servicio y un menor precio y huella de carbono, sin embargo, es menor resistente a la corrosión. A continuación, podemos ver en la Tabla 17 sus propiedades principales.

Tabla 17. Propiedades principales del boro.

<b>Composición</b>	100 %
<b>Precio</b>	60,1 – 89,2 €/kg
<b>Densidad</b>	$2,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo de Young</b>	439 – 461 GPa
<b>Punto de fusión</b>	2370 °C

Así como la energía necesaria para su producción y su reciclabilidad en la Tabla 18.

Tabla 18. Producción y reciclabilidad del carburo de boro.

<b>Energía contenida (producción primaria)</b>	(1,05-1,16) $10^3$ MJ/kg
<b>Huella de carbono (producción primaria)</b>	69,8 - 77 kg/kg
<b>Energía contenida (reciclaje)</b>	119 - 131 MJ/kg
<b>Huella de carbono (reciclaje)</b>	9,32 - 10,3 kg/kg
<b>Reciclable</b>	Sí
<b>Downcycle</b>	Sí
<b>Vertedero</b>	Sí

Por ello, podemos ver que el carburo de boro es una opción más sostenible y barata que el hafnio, su uso dependerá del diseño del reactor, siendo esta la opción adecuada si no se necesita un control tan exacto de los neutrones emitidos. Además, el ácido bórico también se usa como moderador de la reactividad dentro del reactor, éste se disuelve en el refrigerante y se controla su nivel continuamente, renovándolo en periodos largos de tiempo.

## Cadmio

El cadmio es otro de los materiales más utilizados en la construcción de barras de control. En relación con el boro y el hafnio vistos anteriormente, el cadmio presenta una menor temperatura de fusión, lo que puede limitar la temperatura de operación del reactor, además también presenta una menor resistencia a la corrosión, especialmente frente al agua. Sin embargo, el cadmio es el material más barato y abundante de los tres, y también el que presenta una mayor absorción neutrónica, sobre todo frente a neutrones térmicos. Los neutrones térmicos son neutrones de baja energía que están en equilibrio térmico con

el medio, es decir, presentan una energía cinética parecida a la de las partículas de su entorno.

A continuación, podemos ver en la Tabla 19 las propiedades principales del cadmio.

Tabla 19. Propiedades principales del cadmio.

<b>Composición</b>	100 %
<b>Precio</b>	2,25 – 2,85 €/kg
<b>Densidad</b>	$8,64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo de Young</b>	50 – 55 GPa
<b>Punto de fusión</b>	300 °C

Así como los datos relativos a su producción y reciclabilidad en la Tabla 20.

Tabla 20. Producción y reciclabilidad del cadmio.

<b>Energía contenida (producción primaria)</b>	86,9-95,8 MJ/kg
<b>Huella de carbono (producción primaria)</b>	5,25 – 5,78 kg/kg
<b>Energía contenida (reciclaje)</b>	17,8 – 19,7 MJ/kg
<b>Huella de carbono (reciclaje)</b>	1,4 – 1,55 kg/kg
<b>Reciclable</b>	Sí
<b>Downcycle</b>	Sí
<b>Vertedero</b>	No

Por lo tanto, el uso del cadmio como material de las barras de control dependerá de la temperatura de diseño del reactor, ya que este es su factor limitante. Para reactores que operan a una temperatura baja, el cadmio será la mejor opción por su precio, características e impacto medioambiental.

### 3.2.2.2. Combustible nuclear

El combustible nuclear es el corazón del reactor, y el que produce la energía de este. A continuación, vamos a analizar el dióxido de uranio, el cual es el combustible más usado en la industria nuclear. Y por otro lado, vamos a analizar el revestimiento de las barras de control.

#### Óxido de uranio

El óxido de uranio se dispone dentro del reactor en forma de pastillas cerámicas, en el interior de unos tubos de acero que juntos forman los elementos combustibles.

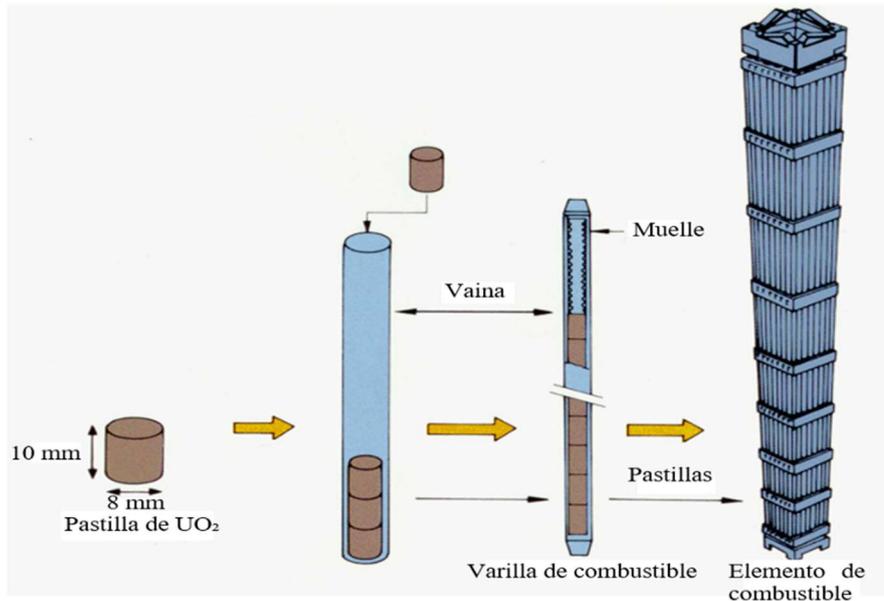


Ilustración 25. Disposición de los elementos combustibles en un reactor nuclear.

A continuación, podemos ver en la Tabla 21 las propiedades más importantes del óxido de uranio como combustible nuclear.

Tabla 21. Propiedades principales del dióxido de uranio.

<b>Precio</b>	154 – 179 €/kg
<b>Densidad</b>	$1,1 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo de Young</b>	214 – 225 GPa
<b>Punto de fusión</b>	2880 °C
<b>Conductividad térmica</b>	8 – 10,4 W/m°C
<b>Energía contenida (producción primaria)</b>	1230-1360 MJ/kg
<b>Huella de carbono (producción primaria)</b>	81,9 – 90,3 kg/kg

Entre las distintas propiedades del dióxido de uranio, destaca su conductividad térmica, lo que permite disipar con mayor facilidad el calor que se genera debido a las reacciones nucleares, por otro lado, presenta una resistencia a la corrosión excelente en cualquier medio, además de un elevado punto de fusión.

Sin embargo, presenta una elevada energía contenida de producción, así como un gran impacto en la huella de carbono, esto es debido a que el proceso de enriquecimiento del uranio-235 es caro y costoso. Además, una vez el combustible agota su ciclo de vida, debe permanecer un determinado periodo de tiempo en el interior de una piscina de seguridad, donde se enfría y reduce su radiactividad, para luego ser almacenado en un contenedor especial y depositado en un vertedero de desechos nucleares.

Con los nuevos SMR de IV generación, este combustible nuclear gastado podrá ser aprovechado para seguir produciendo energía, de modo que se reduzcan al máximo los residuos nucleares provenientes de los reactores.

### Aleación de circonio-estaño

Como hemos visto antes, las pastillas de combustible nuclear se disponen en el interior de unos tubos, estos tubos están formados por una aleación de circonio-estaño. El circonio es un material con unas propiedades mecánicas y térmicas parecidas al hafnio, pero con una considerable menor capacidad de absorción neutrónica. A continuación, podemos ver en la Tabla 22 su composición y características principales.

Tabla 22. Composición de la aleación de circonio.

<b>Cr (cromo)</b>	0,05 – 0,15 %
<b>Fe (hierro)</b>	0,15 – 0,25 %
<b>Ni (níquel)</b>	0 – 0,007 %
<b>Sn (estaño)</b>	1,2 – 1,7 %
<b>Zr (circonio)</b>	97,9 – 98,6 %

A esta aleación se le incorporan elementos como el cromo o el estaño, lo que le confiere una mayor resistencia a la corrosión.

Tabla 23. Propiedades principales de la aleación de circonio.

<b>Precio</b>	125 – 165 €/kg
<b>Densidad</b>	$6,45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo de Young</b>	90 – 105 GPa
<b>Temperatura máxima de servicio</b>	510 °C
<b>Conductividad térmica</b>	11 – 14 W/m°C
<b>Energía contenida (producción primaria)</b>	1510 - 1660 MJ/kg
<b>Huella de carbono (producción primaria)</b>	95,5 – 106 kg/kg

Esta aleación presenta un precio considerablemente mayor al del resto de las aleaciones, además de una gran energía contenida y un gran impacto en la huella de carbono.

### 3.2.2.3. Moderadores

Los moderadores, tal y como hemos explicado al inicio, son los encargados de ralentizar los neutrones para así favorecer que se produzcan los choques que dan lugar a las reacciones nucleares. Los moderadores más utilizados son el agua ligera y el agua pesada, sin embargo, aún es comúnmente usado el grafito.

## Grafito

El grafito es una forma alotrópica del carbono, sus átomos forman capas planas hexagonales que se apilan unas sobre otras, como podemos ver en la Ilustración 26 [18].

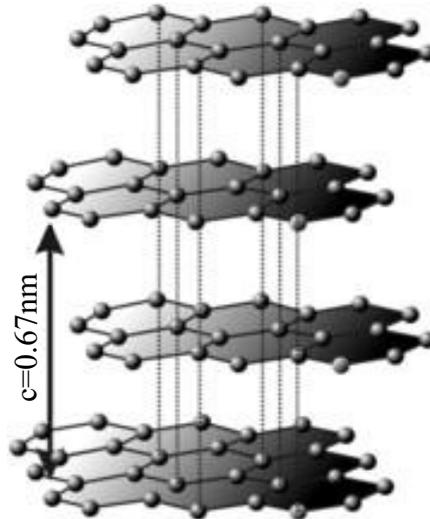


Ilustración 26. Estructura atómica del grafito [18].

El grafito se puede obtener de diversas maneras, una de estas formas consiste en la combustión incompleta del carbón natural o del petróleo, los productos obtenidos son extruidos con la forma deseada y sinterizados a  $1000^{\circ}\text{C}$ , para después ser grafitizados mediante ciclos térmicos largos a una temperatura de  $2500^{\circ}\text{C}$ - $2800^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, este proceso de obtención requiere una considerable cantidad de energía, y supone un importante impacto en la huella de carbono debido a las combustiones que tienen lugar para ello.

Pese a esto, el grafito ofrece propiedades aptas como moderador en los reactores nucleares. Como podemos ver en la Tabla 24.

Tabla 24. Propiedades principales del grafito.

<b>Precio</b>	11,2 – 17 €/kg
<b>Densidad</b>	$2,26 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo de Young</b>	9 – 18 GPa
<b>Temperatura máxima de servicio</b>	$1700^{\circ}\text{C}$
<b>Conductividad térmica</b>	80 – 240 W/m°C
<b>Energía contenida (producción primaria)</b>	209 - 230 MJ/kg
<b>Huella de carbono (producción primaria)</b>	15,8 – 17,4 kg/kg

Como podemos ver, una de las desventajas del grafito es su poco comportamiento elástico, debido a su estructura cristalina, la cual hace que presente una baja resistencia frente a impactos. Sin embargo, podemos ver que presenta una buena resistencia frente a las altas temperaturas, siendo su punto de fusión  $3650^{\circ}\text{C}$ , y con una elevada conductividad térmica que le permite disipar el calor generado en las reacciones. Sin embargo, podemos ver el importante impacto en la huella de carbono que supone su fabricación. Esto hace que, a pesar de ser un material relativamente barato, actualmente se opte por utilizar como moderadores el agua ligera o el agua pesada, ya que estas, además de cumplir la función de ralentizar los neutrones, también actúan como refrigerante del núcleo y presentan mayores ventajas de rendimiento, seguridad y manejo de los desechos radiactivos.

## Capítulo 4: Impacto medioambiental

El estudio de impacto medioambiental es un proceso exhaustivo que evalúa las consecuencias ambientales de un proyecto. Para el caso de los SMR, se analizarán los siguientes impactos: 4.1. Impacto en la atmósfera, 4.2. Impacto en el suelo, 4.3. Impacto en el medio acuático, 4.4. Impacto en la flora y la fauna local, 4.5. Impacto en los humanos y la sociedad y 4.8. Impacto medioambiental en caso de accidente.

### 4.1. Impacto en la atmósfera

Para el impacto atmosférico de los SMR, vamos a diferenciar cuatro etapas: diseño, construcción, operación y desmantelamiento.

#### 4.1.1. Diseño

El objetivo de este apartado es comparar el impacto atmosférico que supone la instalación de un SMR frente a un reactor convencional. Para ello, utilizaremos como ejemplo la estimación de materiales del reactor Westinhouse (W-SMR) previamente explicado frente al reactor AP1000 usado en las centrales nucleares actuales.

Para ello, primero vamos a ver a continuación la Tabla 25 la cual recoge las características de ambos reactores [19].

Tabla 25. Comparativo reactor AP1000 y Westinhouse SMR.

Descripción	AP1000	W-SMR
Tipo de reactor	PWR	SMR-PWR
Potencia eléctrica (MWe)	1117	225
Hormigón (millones de toneladas)	0,24	0,08
Acero corrugado (miles de toneladas)	12	4

Con la información de las toneladas de hormigón en ambos reactores, y los kg/kg de CO<sub>2</sub> del hormigón previamente vistos, podemos calcular el impacto en la huella de carbono de ambos reactores.

$$CO_2 = m \times t \quad (4.1)$$

Utilizando la ecuación (4.1), donde CO<sub>2</sub> es la cantidad de este gas emitida a la atmósfera en toneladas, m son las toneladas de material utilizadas en el proyecto y t las toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de material fabricado, obtenemos:

Tabla 26. Resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> hormigón de alta densidad.

<b>AP1000</b>	30.000 toneladas de CO <sub>2</sub>
<b>W-SMR</b>	10.000 toneladas de CO <sub>2</sub>

Como podemos ver, existe una importante diferencia entre el reactor convencional y el SMR, consiguiendo una reducción del 33,3% en emisiones. Además, empleando el uso del hormigón basado en geopolímeros que vimos anteriormente, es posible reducir aún más este valor, hasta las 5.382 toneladas. Por lo tanto, empleando el hormigón basado en geopolímeros se reduce casi a la mitad la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera.

Vamos a analizar ahora el impacto en la huella de carbono del acero corrugado utilizando la ecuación (4.1).

Tabla 27. Resultados de emisión de CO acero corrugado.

<b>AP1000</b>	87.480 toneladas
<b>W-SMR</b>	29.160 toneladas

Como podemos ver en la Tabla 27, el uso de acero corrugado también supone un gran impacto en la huella de carbono, habiendo una diferencia considerable entre el reactor convencional y el SMR.

Si comparamos las toneladas de CO<sub>2</sub> de los materiales en función los TWe totales de energía generada por ambos reactores al final de su vida útil, obtenemos los siguientes datos en la Tabla 28.

Tabla 28. Emisión de CO<sub>2</sub> en función de los MWe generados.

<b>AP1000</b>	520 TWe	0,0002259 toneladas de CO <sub>2</sub> /MWe
<b>W-SMR</b>	114 TWe	0,00007531 toneladas de CO <sub>2</sub> /MWe

En el caso del W-SMR, a pesar de producir una menor cantidad de energía eléctrica al final de su vida útil en comparación con los reactores convencionales, cada MWe producido tendrá asociadas unas menores emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la fabricación de sus materiales.

#### 4.1.2. Construcción

Durante la construcción de los SMR, el impacto generado por la emisión directa de gases a la atmósfera será debido a los gases de escape de los vehículos y máquinas desplazadas al lugar de la instalación. El impacto de estas emisiones dependerá del tipo de proyecto y de la duración de este, sin embargo, la ventaja del modularidad podría suponer un avance

importante, dado que los módulos pueden ser fabricados en otro lugar, para después ser instalados en la localización de la instalación, lo que supondría una menor cantidad de horas de trabajo en la ubicación del proyecto. Esta modularidad también permitiría instalar nuevos módulos con el reactor ya construido, aunque esto no significaría un impacto importante en la emisión de contaminantes atmosféricos [20].

A continuación, se puede ver en la Tabla 29 una comparativa del impacto en la huella de carbono de un reactor convencional (AP1000) y un SMR (Westinhouse) en las operaciones de construcción [19].

Tabla 29. Comparativa del impacto en la huella de carbono en las operaciones de construcción por año.

<b>Descripción</b>	<b>AP1000</b>	<b>W-SMR</b>
<b>Movimientos de tierra y agua (toneladas de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	1714	386
<b>Planta dosificadora (toneladas de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	486	0
<b>Elevaciones y aparejamientos (toneladas de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	800	180
<b>Operaciones de construcción del reactor (toneladas de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	200	45
<b>Mantenimiento del equipo (toneladas de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	143	32
<b>Total/año (toneladas de CO<sub>2</sub>-eq)</b>	3.343	643

Podemos ver que las operaciones de construcción también suponen una reducción importante de la huella de carbono, ya que un reactor convencional tarda una media de 60 meses para su construcción, mientras que un SMR está diseñado para ser construido en menos de 24.

#### **4.1.3. Operación**

Durante la operación del SMR, no se espera que haya diferencias considerables frente a la emisión de gases contaminantes de los reactores convencionales. Debido también a que la energía nuclear es una energía libre de emisiones de gases de efecto invernadero [20]. El impacto en la huella de carbono estimado tanto para los reactores convencionales como para los SMR es de entre 5,9-13,2 g CO<sub>2</sub>-eq/kWe [19].

#### **4.1.4. Desmantelamiento**

Durante esta fase, tampoco se espera que haya diferencias considerables entre los reactores convencionales y los SMR, el impacto dependerá del tamaño de la instalación

y de su actividad. En este apartado de nuevo, la modularidad permitiría que los elementos del reactor se desmantelen de una manera más rápida y eficiente, reduciendo así el impacto en la zona de la instalación [19].

A continuación, podemos ver en la Ilustración 27 la distribución de las emisiones de CO<sub>2</sub> durante las distintas fases de vida de los SMR, en la que podemos observar que la fase de construcción junto con los materiales son las que generan un mayor impacto en la huella de carbono, superando a todo el CO<sub>2</sub> emitido durante la fase de operación y durante el desmantelamiento, el cual es despreciable.

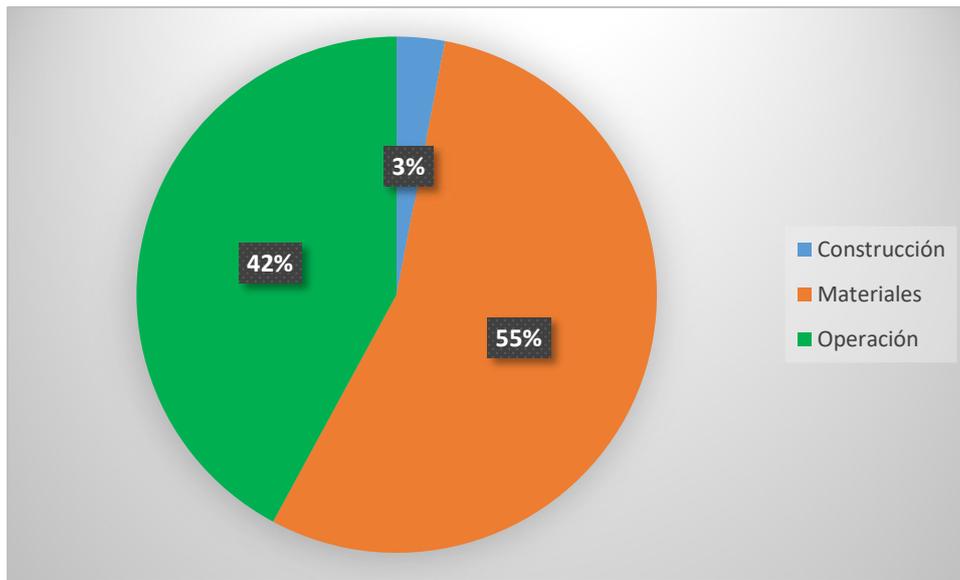


Ilustración 27. Distribución en la emisión de CO<sub>2</sub> durante la vida de los SMR.

## 4.2. Impacto en el suelo

Durante la vida de los SMR, existe la posibilidad de que algunos contaminantes se filtren a través del suelo o de las aguas superficiales y alterar la calidad del terreno. Para evitar esto, se debe preparar el terreno adecuadamente durante la fase de construcción y realizar análisis de la radiactividad y presencia de elementos contaminantes en el terreno durante su operación [20].

### 4.2.1. Construcción

Tal y como hemos visto, existen numerosos diseños de los SMR que incluyen su instalación en superficie o bajo tierra. En el caso de los SMR instalados bajo el suelo, es necesaria la preparación adecuada del terreno, asegurando su impermeabilidad, ya que, en el caso de una fuga, los contaminantes podrían filtrarse con más facilidad en el terreno y generar daños mayores.

Además, es necesario examinar el terreno para conocer si hay aguas subterráneas, las cuales en caso de contaminarse podrían desembocar en un río o en el mar y generar daños catastróficos [20].

#### **4.2.2. Operación**

Durante la operación, es importante realizar periódicamente mediciones de la cantidad de contaminantes del terreno, así como revisar el estado de la estructura de contención del reactor para prevenir posibles fugas de material en caso de accidente [20].

#### **4.2.3. Desmantelamiento**

Al finalizar el ciclo de vida de los reactores, se debe prestar especial atención a la hora de realizar su desmantelamiento, debido a que es un momento crítico en el que el reactor se encuentra abierto y es posible que la estructura de contención haya sufrido desgaste. Sin embargo, el hecho de poder transportar los reactores íntegramente podría suponer una enorme ventaja a la hora de evitar posibles accidentes [20].

### **4.3. Impacto en el medio acuático**

Dado que muchos de los SMR podrían estar instalados junto a un río, lago o el mar, sus posibles impactos en el medio acuático podrían ocurrir en cualquiera de sus fases de vida, debido a la emisión de contaminantes y fugas radiactivas.

#### **4.3.1. Construcción**

En la construcción, el impacto en el medio acuático dependerá del lugar de la construcción, la cantidad de maquinaria movilizada y la necesidad de realizar trabajos en el agua, como canalizaciones o secado de áreas concretas. El secado de estas zonas podría incluso tener un mayor impacto en los SMR subterráneos, ya que tal y como hemos visto antes, se podrían filtrar residuos a través de las aguas subterráneas y desembocar en ríos, lagos o mares. También, el secado de ciertos tramos de ríos puede ocasionar una alteración en el caudal, variando su cantidad y calidad, así como afectar del mismo modo a las aguas subterráneas. Durante la construcción también se pueden verter partículas que produzcan turbidez en el agua, así como hidrocarburos por los trabajos de la maquinaria [20].

#### **4.3.2. Operación**

El agua utilizada de ríos, lagos o el mar como refrigerante puede tener un impacto negativo en los mismos al ser devuelta a los mismos, debido al potencial riesgo de contaminación química o radiológica. Por ello, se debe controlar en todo momento la

calidad del agua a la hora de devolverla a su lugar de extracción, prestando especial atención a la temperatura de esta, ya que el aumento en la temperatura de un medio acuático tiene efectos devastadores e irreversibles para la flora y la fauna que lo habitan. En la Tabla 30 se puede ver el caudal diario de agua de una central de 1MWe y la variación de temperatura de entrada y salida del agua [20].

Tabla 30. Caudal de agua y aumento de temperatura en una central de 1MWe.

<b>Potencia del reactor</b>	1.000 kWe
<b>Caudal de agua diario requerido</b>	4.110 - 5.480 m <sup>3</sup> /día
<b>Media diaria de variación de temperatura del agua devuelta</b>	± 3°C

### 4.3.3. Desmantelamiento

Del mismo modo que la construcción, las actividades de desmantelamiento podrían tener un efecto directo en el medio acuático. Una posible solución a este problema es evitar retirar las estructuras y componentes del reactor que no suponen un riesgo para el ecosistema, a modo de evitar la emisión de contaminantes innecesarios [20].

## 4.4. Impacto en la flora y la fauna local

Los impactos en la flora y fauna pueden ocurrir debido a impactos en la atmósfera, el suelo y la calidad del agua, y también por el impacto por la construcción de estructuras produciendo una alteración del hábitat de manera directa, y de manera indirecta por el ruido, las vibraciones o la luz.

### 4.4.1. Construcción

Durante la construcción, es probable que se necesite excavar, retirar y readaptar diversas zonas del terreno, esto genera una pérdida de ese hábitat debido a la vegetación retirada, afectando de manera indirecta a los animales. Otra de los impactos que podría causar la construcción de los SMR en el hábitat es de manera indirecta por la alteración de ríos o lagos, al modificar el caudal de estos, la vegetación y fauna de ese hábitat puede verse afectada. Durante la construcción, se genera una gran cantidad de ruido y vibraciones debido a la maquinaria y a los vehículos, como excavadoras o camiones, y estos ruidos y vibraciones también afectan de manera negativa a la fauna local, puesto que pueden ser muy molestos para animales sensibles a estas perturbaciones [20].

#### **4.4.2. Operación**

Durante la fase de operación de los SMR, no se espera que haya diferencias determinantes en comparación con las actuales centrales nucleares, sin embargo, los SMR al disponer de menos elementos y tener un reducido tamaño, podría significar un menor impacto a la fauna en su fase de operación [20].

#### **4.4.3. Desmantelamiento**

Al igual que en los anteriores apartados, el impacto en la flora y la fauna durante la fase de desmantelamiento de los SMR dependerá de la instalación, pudiendo su tamaño modular traducirse en menores consecuencias negativas [20].

#### **4.5. Impacto en los humanos y la sociedad**

Habitualmente, todos los potenciales peligros tanto radiológicos como no radiológicos son estudiados y recogidos en un estudio de seguridad y salud durante la fase de diseño del reactor.

Actualmente, todos los diseños de SMR incorporan avanzados sistemas de seguridad activa y pasiva frente a la radiación, por lo que en condiciones normales de operación no generarán un impacto importante en la salud tanto para los trabajadores, como para los residentes cercanos. Además, muchos de los diseños de los SMR prevén su instalación en lugares remotos, alejados de las ciudades, por lo que su impacto social no será tan elevado como el de las actuales centrales nucleares [20].

#### **4.6. Gestión del combustible nuclear gastado**

Al final del ciclo de vida de los SMR, la cantidad de combustible nuclear gastado y su radiactividad dependerá de varios aspectos, como el tamaño del núcleo, el enriquecimiento del combustible y la velocidad de combustión de este. Este combustible nuclear gastado aún sigue generando calor y desprendiendo radiaciones nocivas, por lo que debe ser manejado correctamente. Una de las alternativas es confinar el combustible en la propia instalación del SMR, hasta que su nivel de radiactividad se lo suficientemente bajo como para desecharlo en un vertedero de manera segura, esto permitiría evitar desplazamientos con dicho combustible, y además la propia instalación del reactor ya dispone de medidas de seguridad frente a la radiación y en caso de fugas, por lo que este podría ser el lugar más adecuado para confinarlo. La siguiente opción sería transportar ese combustible nuclear a vertederos nucleares, en los que pueda ser desechado junto a desechos de otros reactores nucleares, esta opción tiene la ventaja de que el combustible

de las centrales se encuentra en lugares específicos y estrictamente controlados, por lo que en el caso de un problema se podría actuar con rapidez de una manera eficiente. La última opción sería utilizar ese combustible nuclear gastado en centrales nucleares de IV generación, las cuales permitirían seguir aprovechando este combustible hasta agotarlo completamente, reduciendo así de manera casi completa la emisión de residuos radiactivos, sin embargo, estas centrales aún están en fase de investigación y no se espera que empiecen su construcción hasta después del año 2030 [20].

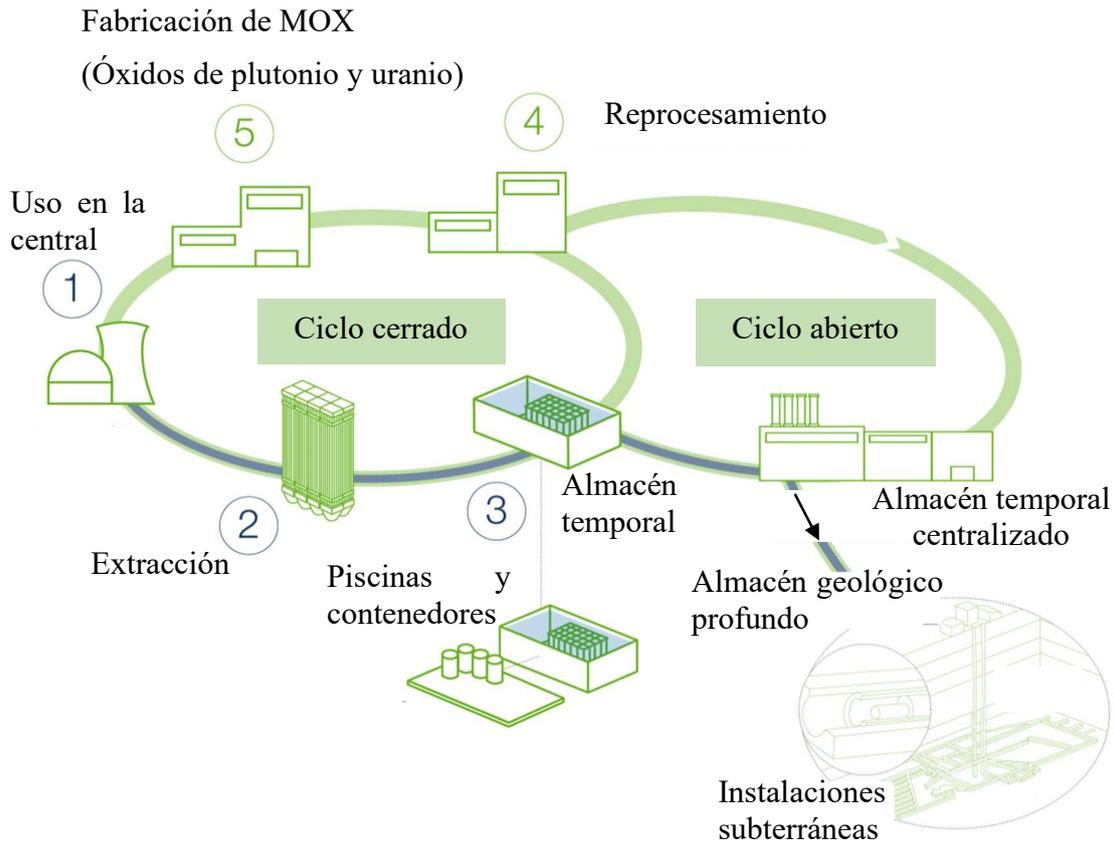


Ilustración 28. Ciclo del combustible nuclear en España [21].

#### 4.7. Gestión de los desechos no radiactivos

Generalmente, los desechos no radiactivos producidos en las centrales nucleares actuales pasan por una serie de pasos antes de su deposición. Estos pasos suelen ser una recolección, una caracterización para comprobar que no son radiactivos, un transporte seguro y un almacenaje previo a su eliminación o deposición, dependiendo del material [20].

#### **4.8. Impacto medioambiental en caso de accidente**

A pesar de las avanzadas medidas de seguridad de los SMR, existe la probabilidad de que ocurra un accidente, cuyos efectos en el medioambiente y las personas dependerían del tipo de accidente y su magnitud.

Las posibles consecuencias ocasionadas por un accidente nuclear son distintas en los SMR y en los reactores convencionales, debido a los diseños de seguridad de los SMR y sus mejoras en la protección. A continuación, podemos ver algunas de estas mejoras [20]:

1. Refrigerante: el uso de refrigerantes alternativos puede suponer una importante mejora en la seguridad frente a las altas temperaturas del reactor en caso de un accidente. Por ejemplo, el plomo fundido puede actuar como refrigerante en caso de accidente frente a temperaturas más elevadas que el agua ligera y el agua pesada comúnmente usadas, lo que reduce la posibilidad de sufrir una fusión del núcleo.
2. Autocontrol del reactor: algunos diseños de SMR tienen la capacidad de ajustar automáticamente la potencia del reactor, e incluso su apagado durante un accidente, esto permite reducir la probabilidad de fallo debido al factor humano y también supone una medida segura frente a la fusión del núcleo en caso de un accidente.
3. Temperatura de diseño del combustible: en muchos diseños de SMR, las barras que recubren el combustible nuclear se diseñan de modo que sean puedan resistir mayores temperaturas que las que se pueden generar en un accidente.
4. Contenedor sumergido: algunos diseños de SMR enfriados por agua incorporan un contenedor de acero compacto sumergido en agua, lo cual reduce la posibilidad de emisión de materiales radiactivos a la atmósfera en caso de accidente.
5. Diseños de reactor integrales: los SMR integran los componentes principales del reactor dentro de la vasija de contención, por lo que, en caso de fuga en alguno de estos componentes, quedaría confinada dentro de la vasija, evitando así su emisión al exterior.

6. Repostaje de combustible: muchos diseños de SMR permiten sustituir el combustible nuclear de manera modular, sin necesidad de manipular individualmente los componentes, reduciendo así la posibilidad de accidente durante el repostaje.

Sin embargo, los SMR presentan también el riesgo de sufrir varios tipos de accidente distintos a los reactores convencionales, los cuales vamos a ver a continuación:

1. Cogeneración: dado que muchos SMR están diseñados para dar apoyo a un proceso industrial en la misma localización, un accidente en el complejo industrial podría poner en riesgo el funcionamiento del reactor. Por lo que deben desarrollarse nuevas protecciones y elementos de seguridad para los complejos industriales a la hora de trabajar conjuntamente con los SMR.
2. Diferentes escenarios: algunos de los diseños de los SMR, como los que se construirán bajo tierra, son susceptibles de sufrir accidentes e impactos medioambientales diferentes comparados con los reactores convencionales. Por ello, se deben estudiar a fondo todos estos posibles escenarios, de manera que pueda anticiparse a un accidente, e implementar medidas que reduzcan al máximo los daños en el caso de producirse.

## Capítulo 5: Estudio económico

En este apartado, se va a realizar el estudio económico de una central compuesta por 12 SMR de agua ligera (LW-SMR) de 77 MWe cada uno. Obteniendo una potencia total de 924 MWe. El modelo de SMR elegido es el reactor NuScale previamente analizado. Para ello, primero vamos a analizar los costes actuales de construcción de una central convencional.

### 5.1. Central nuclear convencional

Antes de comenzar con el análisis de costes de un SMR, conviene introducir un análisis de costes de un reactor convencional. Para ello, se ha elegido un reactor nuclear PWR12-BE de Westinghouse, refrigerado por agua ligera y con una potencia térmica de 3.417 MWt y una potencia eléctrica de 1.144 MWe. Este reactor tiene una potencia térmica y eléctrica similar a la planta de 12 reactores de NuScale, y es comúnmente utilizado en centrales nucleares de todo el mundo [22].

A continuación, se muestra en la Tabla 31 la estimación de costes de dicho reactor. La tabla completa con el desglose de los precios de todas las partidas se encuentra en el anexo I.

Tabla 31. Cálculo de costes PWR12-BE [22].

<b>PWR12-BE</b>			
<b>Partida</b>	<b>Coste de mano de obra (M€)</b>	<b>Coste de material (M€)</b>	<b>Coste total (M€)</b>
<b>Estructuras y edificaciones</b>	319,04	245,17	56,42
<b>Equipamiento del reactor</b>	129,87	664,68	794,55
<b>Equipamiento de las turbinas</b>	117,94	511,01	628,95
<b>Equipamiento eléctrico</b>	97,59	130,96	228,56
<b>Equipamiento adicional</b>	63,74	67,51	131,26
<b>Sistema anti-pérdida de calor</b>	42,94	94,71	137,66
<b>Coste total</b>	<b>771,14</b>	<b>1.714,062</b>	<b>2.485,21</b>

## 5.2. Central nuclear SMR

### 5.2.1. Diseño de la planta

Como hemos hablado previamente, la central nuclear SMR estará formada por 12 reactores tipo NuScale de 77 MWe cada uno. Esto da lugar a una potencia térmica de 250 MWt con una eficiencia del 30,8%, lo que resulta en una potencia eléctrica de salida de 924 MWe [22].

La planta tiene una superficie de 300.000 metros cuadrados, las vasijas de contenciones de los reactores estarían formadas por una piscina rectangular de hormigón de alta densidad de 105,5 m de largo, 46 m de ancho y 50,9 m de alto, situada a una profundidad de 23,2 m bajo tierra. Cada reactor estaría formado por una vasija de presión de hormigón de alta densidad de 16,8 m de alto y 23,1 m de diámetro, con un espesor de 20,3 cm. En el interior de esta vasija, se encuentra la vasija de contención de acero del reactor, de 23,1 m de alto, 4,5 m de diámetro y 8,6 cm de espesor. Tanto la vasija de presión como la vasija de contención tendrían un peso de aproximadamente 263 y 203 toneladas respectivamente [22].

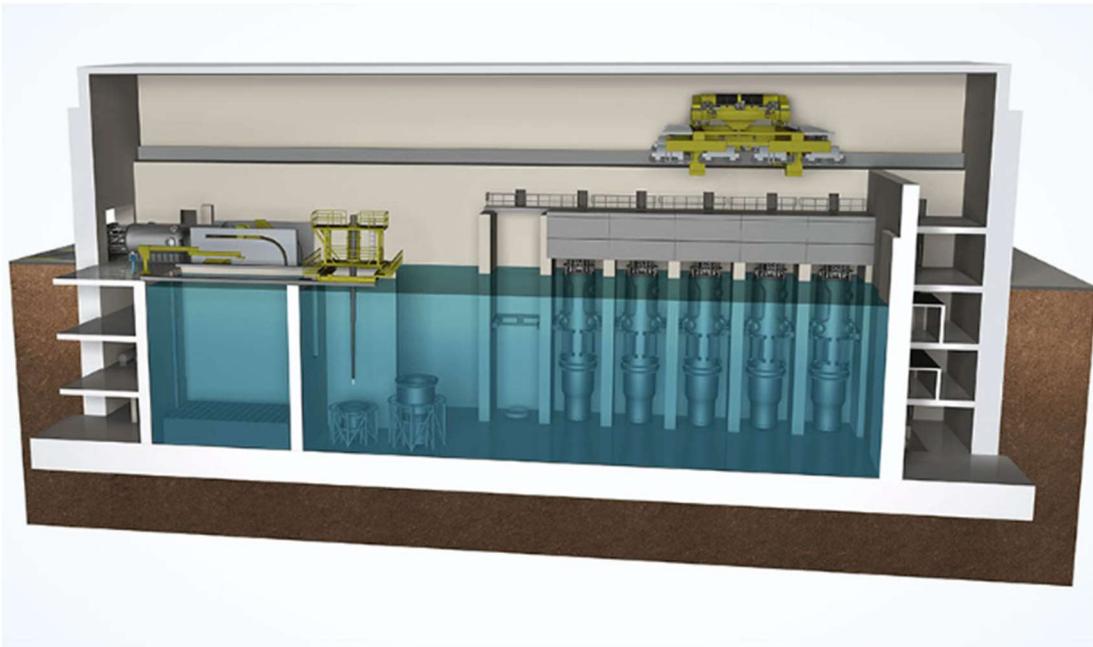


Ilustración 29. Diseño de la sala del reactor [23].

Cada reactor estaría formado por 37 elementos combustibles y 24 barras de control, compuestas por una aleación de cadmio y carburo de boro. Dado que los reactores son modulares, cada uno tendría en su interior dos generadores de vapor helicoidales y un presurizador integrados en la vasija de contención [22].

Como vimos anteriormente, el reactor NuScale emplea la circulación natural del refrigerante a través del núcleo del reactor, por lo que se elimina la necesidad de instalar bombas de impulsión. El refrigerante del circuito primario saldría del núcleo a 310 °C, realizando un intercambio térmico con el circuito secundario en los generadores de vapor. Este vapor sería conducido a la turbina situada fuera del reactor para generar electricidad [22].

Junto a la sala del reactor, estaría la sala de control, de aproximadamente 35,7 m de largo, 24,7 m de ancho y 21,3 m de alto, en su interior estarían todos los mandos y personal encargados de controlar la central [22].

En este diseño de central, se contempla la construcción de un almacén de almacenamiento de combustible gastado, de 56,4 m de largo, 28,7 m de alto y 56,4 m de ancho [22].

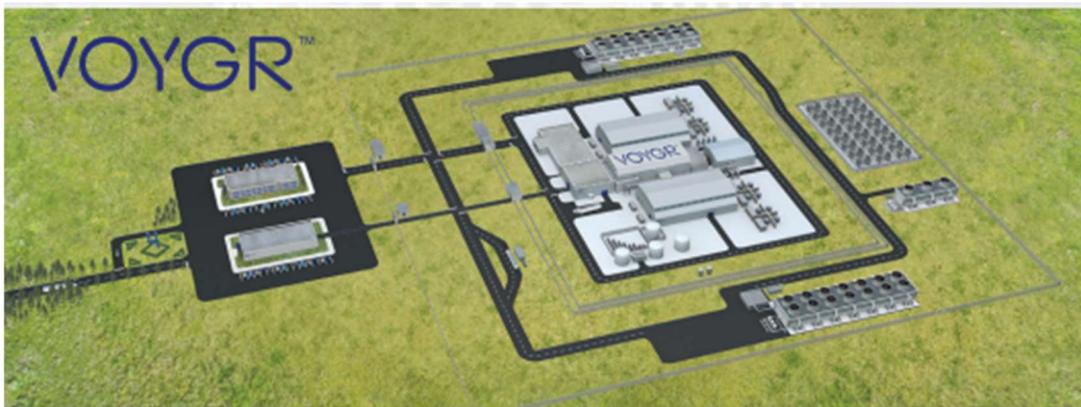


Ilustración 30. Diseño de la central [23].

Como podemos ver en la ilustración 31, así quedaría el diseño de la central, con la sala de los reactores y el edificio de control en el centro, las torres de refrigeración a los lados y el almacén de combustible nuclear gastado a la derecha.

### 5.2.2. Cálculo de costes

Una vez que ya hemos definido el diseño de la planta, podemos proceder a su cálculo de costes.

A continuación, vamos a ver la Tabla 32 con la estimación de costes del LW-SMR de NuScale [22]. La tabla completa con el desglose de los precios de todas las partidas se encuentra en el anexo II.

Tabla 32. Cálculo de costes LW-SMR [22].

LW-SMR			
Partida	Coste de mano de obra (M€)	Coste de material (M€)	Coste total (M€)
Estructuras y edificaciones	306,77	259,72	566,50
Equipamiento del reactor	23,72	1.163,52	1.187,25
Equipamiento de las turbinas	14,79	456,66	471,45
Equipamiento eléctrico	48,83	137,78	186,61
Equipamiento adicional	35,31	87,15	122,4
Sistema anti-pérdida de calor	17,46	87,48	104,94
<b>Coste total</b>	<b>446,89</b>	<b>2.192,34</b>	<b>2.639,24</b>

En base a estos costes, podemos distribuirlos en función del componente del reactor.

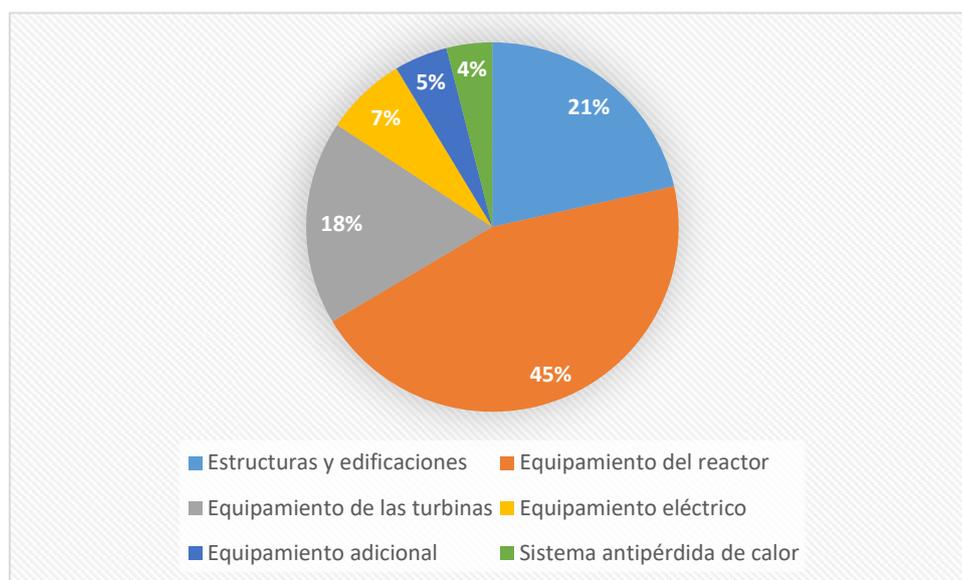


Ilustración 31. Distribución de costes LW-SMR.

Analizando la Ilustración 31, vemos que el elemento que representa un mayor porcentaje en los costes de la central es el equipamiento del reactor con un 45% de dicha distribución. El peso de este equipamiento es considerablemente superior al del resto de componentes de la central, debido a que se trata de tecnología relativamente nueva y menos probada que la de los reactores convencionales, lo que repercute en unos mayores costos en diseño, investigación y desarrollo. Por otro lado, si comparamos el peso del resto de componentes con los de la central convencional, observamos que no hay una diferencia significativa entre ellos, ya que ambas tecnologías son similares.

Tabla 33. Comparativa costes PWR12-BE y LW-SMR.

	<b>Costes mano de obra (M€)</b>	<b>Costes materiales (M€)</b>	<b>Coste total (M€)</b>
<b>PWR12-BE</b>	771,14	1.714,062	2.485,21
<b>LW-SMR</b>	446,89	2.192,34	2.639,24

Analizando la Tabla 33, vemos que el coste total de una central operada por un SMR es superior al de una central convencional actual de similar potencia. Sin embargo, si analizamos a continuación el tiempo de construcción de cada central (tabla 34) podemos ver una enorme diferencia, esto es debido al grado de desarrollo actual de los SMR, ya que mucha de la tecnología que hay detrás de los mismos se encuentra aún en fase de desarrollo. Además, el mercado de los SMR aún se encuentra en un nivel de competitividad bajo, dado que no existen muchos fabricantes y por ende esta baja competitividad repercute en unos elevados costes de venta.

Tabla 34. Comparativa tiempo de construcción PWR12-BE y LW-SMR.

	<b>Tiempo de construcción estimado</b>
<b>PWR12-BE</b>	6-15 años
<b>LW-SMR</b>	3,3 años

Debido a su modularidad y simplicidad, una central como la que hemos visto anteriormente tendrá unos tiempos de construcción y entrada en servicio considerablemente menores a los de una central convencional de similar potencia.

Otro de los aspectos importantes para tener en cuenta a la hora de analizar la rentabilidad entre ambas centrales es su coste de operación y mantenimiento, cuyos resultados podemos ver en la Tabla 35.

Tabla 35. Comparativo costes O&M PWR12-BE y LW-SMR.

	<b>Costes O&amp;M</b>
<b>PWR12-BE</b>	26,97 €/MWe
<b>LW-SMR</b>	10,76 €/MWe

Como podemos ver, el coste de O&M de los SMR es significativamente menor que el de un reactor convencional. Esto repercute de manera positiva en el período de amortización de ambas plantas. Ya que las centrales nucleares actuales en España tienen un período de amortización de 30 años, cifra que podría verse reducida con el uso de los SMR, permitiendo además conseguir un precio de generación €/MWe competitivo frente a las demás energías renovables.

## Capítulo 6: Conclusiones y ampliación

En resumen, los SMR son pequeños reactores nucleares capaces de generar energía de manera eficiente y segura. A pesar de que su descubrimiento se remonta varias décadas atrás, la tecnología de los SMR ha despertado un creciente interés en la época actual debido a su potencial para abordar los desafíos energéticos y climáticos actuales y futuros, gracias a sus características más importantes: flexibilidad, seguridad, modularidad y eficiencia.

### 6.1. Ventajas y desventajas más importantes

Quizá su característica más importante es su modularidad, esto permitirá fabricar estos reactores en fábricas utilizando cadenas de producción, lo cual se traducirá en unos menores costes de construcción. Otra ventaja que aportará esta modularidad es su mantenimiento, ya que permitirá sustituir elementos dañados o envejecidos directamente por repuestos nuevos.

En paralelo a la modularidad, se encuentra su reducido tamaño, lo que permitirá incurrir en menos materiales y por lo tanto menores costes. Este reducido tamaño junto con su menor potencia favorecerá su instalación en zonas inaccesibles para una central nuclear convencional, permitiendo entre otras cosas el transporte del reactor semi ensamblado desde fábrica para su instalación en la ubicación final.

La seguridad es otra de las características que serán determinantes. Gracias a sus innovadores sistemas de seguridad pasiva y activa, permitirán reducir la probabilidad de accidente y requerir un menor número de empleados para su operación y mantenimiento, lo que significará en menores costes de operación y mantenimiento.

A pesar de que en este TFG se ha hablado sobre un uso energético de los SMR, existen numerosos proyectos en marcha contemplando su uso para otras aplicaciones como desalación de agua, generación de calor o producción de gases industriales.

Por último, su capacidad para producir energía casi limpia es otra de las características más importantes. Como hemos visto, una central de SMR de similar potencia que una central convencional necesita de una considerable menor cantidad de materiales para su fabricación, esto ayudará de manera determinante a la descarbonización en la generación de energía, cumpliendo así con los objetivos medioambientales de nuestra sociedad. Sin embargo, también existen muchas barreras que superar antes de que estos reactores sean

puestos en marcha. Quizá uno de los mayores problemas a los que se enfrentarán será a su regularización, actualmente la normativa detrás de la energía nuclear es muy estricta, y se necesitarán muchos informes y controles de calidad para conseguir el visto bueno para la construcción de los SMR. Igual de difícil lo será su aceptación social, ya que a pesar de que cada vez más personas confían en la energía nuclear, todavía hay una gran parte de la sociedad opuesta a su uso.

Otro de sus aspectos negativos es su coste inicial, ya que actualmente es más elevado que una central nuclear convencional, esto puede suponer un obstáculo significativo a su adopción generalizada. Sin embargo, a medida que esta tecnología se optimice, estos costes deberían verse reducidos, aumentando así la competitividad de los SMR frente a otras fuentes de energía.

## **6.2. Materiales**

Tal y como hemos visto, los materiales juegan un papel fundamental en el diseño y funcionamiento de los SMR. Por un lado, deben cumplir unos requisitos altamente exigentes debido a las condiciones que a las que estarán expuestos. Para ello se deben elegir materiales como el hormigón de alta densidad o aleaciones inoxidables como el AISI 304, como revestimiento y material de componentes internos. Por otro lado, en función del diseño y características del reactor se deben elegir los materiales de las barras de control y del combustible nuclear, destacando el boro o cadmio y el óxido de uranio.

Sin embargo, los SMR presentan un menor uso de estos recursos materiales frente a los reactores convencionales, permitiendo así una mayor sostenibilidad y un menor coste.

También se deben seguir investigando en nuevos materiales que puedan suponer un avance tecnológico para los SMR, como el uso de hormigón basado en geopolímeros o moderadores más sostenibles.

## **6.3. Sostenibilidad**

El impacto en el medio ambiente dependerá en gran medida del diseño del reactor y de la localización de la instalación, pero tal y como hemos podido apreciar, los SMR presentan avanzados sistemas de seguridad, y sus características principales permiten un menor impacto medioambiental durante su instalación, operación y mantenimiento.

## 6.4. Conclusión

En definitiva, el mercado de los SMR aún se encuentra en una fase temprana, con muchos obstáculos que superar, pero con un potencial enorme. Será su desarrollo continuo y su despliegue estratégico los que jueguen un papel clave a la hora de facilitar su adaptación en la sociedad.

Bajo mi punto de vista, los SMR no deberían postularse como una alternativa al resto de energías, sino como un complemento sobre todo a las energías renovables y esto no será posible hasta que no consigan reducirse los enormes costes de inversión. Sin embargo, creo en la posibilidad de un modelo futuro energético en España formado por renovables y complementado con energía nuclear, dando lugar a una energía barata y limpia.

## 6.5. Futuras líneas de trabajo

Tras la realización de este TFG, y en base a la situación actual de los SMR, las futuras líneas de trabajo a desarrollar podrían ser las siguientes:

1. **Mejora de la tecnología:** Se debe continuar investigando en nuevas tecnologías que permitan a los SMR ser más eficientes, seguros y rentables. Para ello es necesario seguir investigando en nuevos materiales, sistemas de refrigeración más eficientes y técnicas de fabricación más avanzadas.
2. **Desarrollo de estándares regulatorios:** Los organismos regulatorios de las naciones deben trabajar en conjunto para seguir ampliando y mejorando la normativa nuclear de nuestra sociedad, con el objetivo de conseguir un marco común de regulación atómica internacional que reúna normativas, procedimientos y planes de actuación, para facilitar así la regulación y licencia de los SMR y facilitar su fabricación en todos los países.
3. **Integración con las energías renovables:** Se debe seguir investigando en la forma de conseguir integrar los SMR con las fuentes de energía renovables, solar, eólica, hidráulica, etc. Con el objetivo de conseguir modelos energéticos sostenibles capaces de sostener y adaptarse a la dinámica demanda energética de nuestra sociedad, sin afectar de manera directa al medioambiente.
4. **Aplicaciones especiales:** Tal y como hemos mencionado antes, los SMR no sólo se proyectan como una fuente de producción de energía eléctrica, sino que gracias a sus características, también son capaces de adaptarse a distintas aplicaciones que requieren de una fuente de energía abundante, continua y barata, como la

generación de gases para procesos industriales, la cogeneración, o la desalación de agua.

- 5. Campañas dirigidas a la sociedad:** Otro de los grandes aspectos importantes en relación con los SMR es su aceptación social, se debe seguir invirtiendo en campañas que muestren a la sociedad que la energía nuclear es una energía barata, segura y limpia, y la cual es una apuesta fundamental para dar solución a los futuros problemas energéticos y medioambientales que enfrentará la humanidad.

## Anexos

### Anexo I. Cálculo de costes PWR12-BE.

<b>PWR12-BE</b>			
<b>Partida</b>	<b>Coste de mano de obra (M€)</b>	<b>Coste de material (M€)</b>	<b>Coste total (M€)</b>
<b>Estructuras y edificaciones</b>	319.040.407,84 €	245.170.953,64 €	564.211.361,48 €
<b>Movimiento de tierras</b>	40.765.951,64 €	29.478.022,68 €	70.243.974,32 €
<b>Sala del reactor</b>	100.132.869,92 €	82.095.307,60 €	182.228.177,52 €
<b>Sala de turbinas</b>	31.401.589,04 €	33.670.350,44 €	65.071.939,48 €
<b>Almacén de residuos</b>	25.361.825,84 €	15.018.957,68 €	40.380.783,52 €
<b>Sala de control</b>	31.423.882,48 €	19.444.177,92 €	50.868.060,40 €
<b>Otras estructuras</b>	89.954.289,84 €	65.464.138,24 €	155.418.428,08 €
<b>Equipamiento del reactor</b>	129.874.031,92 €	664.682.807,96 €	794.556.839,88 €
<b>Vasija de presión</b>	7.054.560,00 €	70.247.520,00 €	77.302.080,00 €
<b>Elementos internos</b>	- €	63.143.280,00 €	63.143.280,00 €
<b>Transporte</b>	15.788.304,00 €	- €	15.788.304,00 €
<b>Barras de control</b>	- €	37.856.160,00 €	37.856.160,00 €
<b>Generador de vapor</b>	526.608,00 €	148.890.960,00 €	149.417.568,00 €
<b>Refrigeración, bombas</b>	- €	135.765.504,00 €	135.765.504,00 €
<b>Presurizador</b>	268.272,00 €	10.085.040,00 €	10.353.312,00 €
<b>Sistemas de seguridad</b>	18.362.431,80 €	39.794.205,32 €	58.156.637,12 €
<b>Procesado de desechos radiactivos</b>	11.278.620,40 €	47.582.109,28 €	58.860.729,68 €
<b>Almacenado y manipulación de combustible</b>	- €	2.891.376,00 €	2.891.376,00 €
<b>Otro equipamiento del reactor</b>	42.923.520,00 €	60.569.856,00 €	103.493.376,00 €
<b>Instrumentación y control</b>	21.661.797,44 €	38.921.444,56 €	60.583.242,00 €
<b>Elementos adicionales del reactor</b>	12.009.918,28 €	8.935.445,72 €	20.945.364,00 €

<b>Equipamiento de las turbinas</b>	117.940.322,76 €	511.011.152,60 €	628.951.475,36 €
<b>Turbinas</b>	21.449.968,36 €	355.126.230,24 €	376.576.198,60 €
<b>Sistemas de condensado</b>	22.651.527,92 €	58.805.242,64 €	81.456.770,56 €
<b>Calentador de agua</b>	20.040.651,64 €	46.258.033,32 €	66.298.684,96 €
<b>Otro equipamiento de las turbinas</b>	27.941.062,40 €	34.800.506,96 €	62.741.569,36 €
<b>Instrumentación y control</b>	12.905.081,04 €	6.359.367,52 €	19.264.448,56 €
<b>Elementos adicionales de las turbinas</b>	12.952.031,40 €	9.661.774,68 €	22.613.806,08 €
<b>Equipamiento eléctrico</b>	97.598.338,00 €	130.967.310,24 €	228.565.648,24 €
<b>Equipamiento adicional</b>	63.749.472,60 €	67.510.994,72 €	131.260.467,32 €
<b>Sistema anti-pérdida de calor</b>	42.946.249,52 €	94.719.651,56 €	137.665.901,08 €
<b>Coste total</b>	<b>771.148.822,64 €</b>	<b>1.714.062.870,72 €</b>	<b>2.485.211.693,36 €</b>

## Anexo II. Cálculo de costes LW-SMR.

<b>LW-SMR</b>			
<b>Partida</b>	Coste mano de obra	Coste de material	Coste total
<b>Estructuras y edificaciones</b>	306.775.932,00 €	259.724.789,68 €	566.500.721,68 €
<b>Movimiento de tierras</b>	11.729.781,04 €	8.116.605,24 €	19.846.386,28 €
<b>Sala del reactor</b>	188.138.506,84 €	159.548.089,12 €	347.686.595,96 €
<b>Sala de turbinas</b>	34.989.828,24 €	37.517.838,28 €	72.507.666,52 €
<b>Almacén de residuos</b>	39.351.206,00 €	29.461.732,24 €	68.812.938,24 €
<b>Sala de control</b>	15.972.738,24 €	12.335.878,88 €	28.308.617,12 €
<b>Otras estructuras</b>	16.593.872,56 €	12.744.645,92 €	29.338.518,48 €
<b>Equipamiento del reactor</b>	23.725.238,76 €	1.163.529.913,76 €	1.187.255.152,52 €
<b>Vasija de presión</b>	7.701.278,60 €	554.029.090,36 €	561.730.368,96 €

<b>Vasija de contención y elementos internos</b>	- €	284.928.703,04 €	284.928.703,04 €
<b>Transporte</b>	- €	15.788.304,00 €	15.788.304,00 €
<b>Barras de control</b>	- €	30.972.518,52 €	30.972.518,52 €
<b>Generador de vapor</b>	1.696.848,00 €	70.771.046,92 €	72.467.894,92 €
<b>Procesador de desechos</b>	1.663.166,80 €	54.045.732,12 €	55.708.898,92 €
<b>Almacenamiento y manipulación de combustible</b>	13.627,04 €	1.513.414,72 €	1.527.041,76 €
<b>Otro equipamiento del reactor</b>	5.442.066,80 €	65.942.307,32 €	71.384.374,12 €
<b>Instrumentación y control</b>	464.116,08 €	67.941.591,52 €	68.405.707,60 €
<b>Elementos adicionales del reactor</b>	2.571.015,44 €	17.597.203,40 €	20.168.218,84 €
<b>Equipamiento de las turbinas</b>	14.790.200,60 €	456.669.685,56 €	471.459.886,16 €
<b>Turbinas</b>	1.641.409,72 €	197.451.413,84 €	199.092.823,56 €
<b>Sistemas de condensado</b>	545.671,32 €	69.797.194,72 €	70.342.866,04 €
<b>Calentador de agua</b>	852.152,76 €	91.869.328,72 €	92.721.481,48 €
<b>Otro equipamiento de las turbinas</b>	5.981.465,56 €	64.358.131,72 €	70.339.597,28 €
<b>Instrumentación y control</b>	2.762.646,84 €	15.187.112,52 €	17.949.759,36 €
<b>Elementos adicionales de las turbinas</b>	3.006.855,32 €	18.006.504,04 €	21.013.359,36 €
<b>Equipamiento eléctrico</b>	48.835.687,48 €	137.784.055,76 €	186.619.743,24 €
<b>Equipamiento adicional</b>	35.310.123,48 €	87.150.622,96 €	122.460.746,44 €
<b>Sistema antipérdida de calor</b>	17.460.752,68 €	87.487.703,60 €	104.948.456,28 €
<b>Coste total</b>	<b>446.897.935,00 €</b>	<b>2.192.346.771,32 €</b>	<b>2.639.244.706,32 €</b>

## Bibliografía

- [1] W. Demtröder, *Atoms, molecules and photons*. Springer-Verlag, 2006.
- [2] CSN-CIEMAT, «TEMA 1 INTRODUCCIÓN A LAS RADIACIONES IONIZANTES. NATURALEZA Y TIPOS DE RADIACIÓN. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA».
- [3] «<https://uprl.unizar.es/higiene-industrial/radiaciones-ionizantes-definiciones>».
- [4] CSN, «La energía nuclear». Accedido: 15 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/927506/La+energ%C3%ADa+nuclear+%28Monograf%C3%ADa%29>
- [5] CSN, «El funcionamiento de las centrales nucleares», 2012.
- [6] «<https://www.miteco.gob.es/en/energia/nuclear/centrales/espana.html>».
- [7] «<https://www.ree.es/es/balance-diario/nacional/2023/12/31#>».
- [8] M. Schneider *et al.*, «The World Nuclear Industry Status Report 2022 Aviel Verbruggen». [En línea]. Disponible en: [www.WorldNuclearReport.org](http://www.WorldNuclearReport.org),
- [9] J. Vujić, R. M. Bergmann, R. Škoda, y M. Miletić, «Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper?», *Energy*, vol. 45, n.º 1, pp. 288-295, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.01.078.
- [10] P. H. Lien y U. S. Rohatgi, «Scaling challenges in small modular reactor», *Nuclear Engineering and Design*, vol. 407, jun. 2023, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112309.
- [11] Z. Liu y J. Fan, «Technology readiness assessment of Small Modular Reactor (SMR) designs», *Progress in Nuclear Energy*, vol. 70. pp. 20-28, 2014. doi: 10.1016/j.pnucene.2013.07.005.
- [12] S. Nuclear, E. L. Ulloa, L. Ulloa, W. Technology, y S. A. Services, «REACTORES MODULARES PEQUEÑOS (Small Modular Reactors)». [En línea]. Disponible en: [www.sne.es](http://www.sne.es)
- [13] «BOE-A-1964-7544-consolidado».

- [14] Núm, «Disposición 16041 del BOE núm. 284 de 2018», 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.boe.es>
- [15] Alion, «Los principales fenómenos en la reacción del cemento hidráulico», <https://alion.com.co/reaccion-del-cemento-hidraulico/>.
- [16] «<https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smr-fact-sheet.pdf>».
- [17] J. C. Flores, «Z = 72, hafnio, Hf. El elemento químico gemelo y esquivo acompañante del circonio», *Anales de química*, vol. 115, oct. 2020.
- [18] Universidad de Barcelona, «Grafito», <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/grafito>.
- [19] T. S. Carless, W. M. Griffin, y P. S. Fischbeck, «The environmental competitiveness of small modular reactors: A life cycle study», *Energy*, vol. 114, pp. 84-99, nov. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.111.
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, «Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors», 2020.
- [21] Foronuclear, «El combustible MOX que es y como se utiliza», 2022, Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/el-combustible-mox-que-es-y-como-se-usa/>
- [22] A. Asuega-Souza, «TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF ADVANCED SMALL MODULAR NUCLEAR REACTORS», Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2022.
- [23] NuScale Power, «VOYGR Power Plants», <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants>.