

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería de las Tecnologías Industriales

### Estudio de los reactores modulares pequeños

Autor: Jose Francisco Pérez Bayol

Tutor: Dr. Antonio González Fernández

**Dpto. de Física Aplicada III**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2022





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Estudio de los reactores modulares pequeños**

Autor:

Jose Francisco Pérez Bayol

Tutor:

Dr. Antonio González Fernández

Profesor titular

Dpto. de Física Aplicada III

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado: Estudio de los reactores modulares pequeños

Autor: Jose Francisco Pérez Bayol

Tutor: Dr. Antonio González Fernández

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El secretario del Tribunal



A los que han estado,

los que siguen y

los que vendrán.





# Resumen

---

Los reactores modulares pequeños son reactores nucleares de hasta 300 MWe, de reducido tamaño y de cualidades que los hacen parecer muy atractivos, para incluirlos en la producción de potencia en países con un plan nuclear o en otros donde no se ha iniciado. Es una tecnología en auge y en la que muchos países están poniendo un gran interés, como EE. UU. o Rusia, no solo por sus ventajas técnicas sino también económicas. A lo largo de este documento se hará un seguimiento de los SMR desde los orígenes de la producción eléctrica con energía nuclear hasta la actualidad, se tratarán los aspectos que los diferencian de los reactores de gran tamaño, los distintos tipos en los que se trabajan y el avance de los distintos proyectos en los que se trabajan a lo largo del mundo, centrándonos en algunos de ellos, los más avanzados, para finalmente hacer un balance del futuro y perspectiva de esta tecnología y que hueco tendrá en los distintos países.



# Abstract

---

Small Modular Reactors are nuclear reactors of up to 300 MWe, small in size and with qualities that make them very attractive for inclusion in the production of power in countries with a nuclear plan or in others where it has not been initiated. It is a booming technology in which many countries are showing great interest, such as the USA and Russia, not only because of its technical advantages but also because of its economic advantages. Throughout this document we will follow up on SMRs from the origins of electricity production with nuclear energy up to the present day, we will discuss the aspects that differentiate them from large reactors, the different types they are working on and the progress of the different projects they are developing around the world, focusing on some of them, the most advanced ones, to finally take balance of the future and perspective of this technology and what potential it will have in the different countries.



# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>
<b>Índice</b>	<b>13</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>15</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b>	<b>17</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>19</b>
<b>Glosario</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>3</b>
1.1 <i>Aspectos Generales</i>	4
1.2 <i>Generaciones</i>	5
1.2.1 <i>La primera pila atómica</i>	5
1.2.2 <i>Generaciones posteriores</i>	6
1.2.3 <i>Generación IV</i>	7
1.3 <i>Situación y perspectiva de la energía nuclear en el mundo</i>	8
1.4 <i>Situación y perspectiva de la energía nuclear en España</i>	12
<b>2 Small Modular Reactor</b>	<b>15</b>
2.1 <i>¿Qué es un reactor modular pequeño?</i>	15
2.2 <i>SMR en el mundo</i>	16
2.2.1 <i>Despliegue estimado de los SMR</i>	18
2.3 <i>Diseño y características de los SMR</i>	19
2.4 <i>Tipos de SMR</i>	19
2.4.1 <i>Reactores rápidos (FR)</i>	19
2.4.2 <i>Reactores de alta temperatura (VHTR)</i>	21
2.4.3 <i>Reactores supercríticos refrigerados por agua (SCWR)</i>	22
2.4.4 <i>Reactores de sales fundidas (MSR)</i>	22
2.5 <i>Economía de los SMR</i>	23
2.5.1 <i>Mercado de los SMR</i>	27
2.6 <i>Características del ciclo de combustible</i>	29
<b>3 Micro Modular Reactor</b>	<b>33</b>
3.1 <i>Ultra Safe Energy MMR</i>	34
3.1.1 <i>Diseño de la planta</i>	34
3.1.2 <i>Diseño del reactor</i>	35
3.1.3 <i>Seguridad</i>	39
<b>4 Algunos proyectos de SMR</b>	<b>41</b>
4.1 <i>NuScale Power Inc.</i>	41
4.1.1 <i>Diseño de la planta</i>	42
4.1.2 <i>Diseño del reactor</i>	44
4.1.3 <i>Núcleo y combustible</i>	46
4.1.4 <i>Conversión de potencia</i>	49

4.1.5	Seguridad	50
4.2	<i>Integral Molten Salt Reactor (IMSR-400)</i>	53
4.2.1	Diseño de la planta	53
4.2.2	Diseño del reactor	54
4.2.3	Núcleo y combustible	57
4.2.4	Conversión de potencia	58
4.2.5	Seguridad	59
<b>5</b>	<b>Análisis de riesgos de los SMR</b>	<b>63</b>
5.1	<i>Seguridad en los SMR y sus instalaciones</i>	63
5.2	<i>Impacto medio Ambiental</i>	65
5.2.1	Potenciales impactos en el funcionamiento normal	65
5.2.2	Calidad del suelo	66
5.2.3	Medio acuático	66
5.2.4	Vida Marina	67
5.2.5	Vida Terrestre	67
5.3	<i>Impacto en la vida humana</i>	68
5.4	<i>Potencial impacto en un accidente</i>	69
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>71</b>
	<b>Anexos</b>	<b>73</b>
	<b>Referencias</b>	<b>75</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Características generales de los principales proyectos (14) .....	17
Tabla 2 Resumen del tipo de combustible usado por cada reactor (14) .....	31





# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 1 Evolución de la energía eléctrica cubierta por la nuclear en Alemania (8).....	9
Gráfica 2 Distribución potencia instalada frente número de reactores en el mundo (10).....	10
Gráfica 3 Reactores en construcción frente potencia en cada país (10).....	11
Gráfica 4 Distribución eléctrica Eslovenia (11) y en China (9) .....	12
Gráfica 5 Capacidad estimada de los SMR en 2035 (14).....	18
Gráfica 6 Tendencia del LCOE en SMR con producción en serie .....	24
Gráfica 7 Decaimiento de los productos hasta los niveles naturales.....	37
Gráfica 8 Reducción de riesgo (24).....	52



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 Pila CP-1 (2) .....	5
Figura 2 <i>Timeline</i> del desarrollo de los reactores nucleares .....	6
Figura 3 Distribución de reactores con fines distintos y/o adicionales a la producción eléctrica (6) .....	8
Figura 4 Centrales nucleares en España (13).....	13
Figura 5 Distribución de los distintos proyectos de SMR en el mundo.....	16
Figura 6 Diagrama simplificado de la instalación del HTR-PM (17).....	22
Figura 7 Sistema híbrido formado por renovables junto a un SMR (15) .....	28
Figura 8 Enriquecimiento del U-235 según la finalidad .....	30
Figura 9 Distribución de la planta MMR.....	34
Figura 10 Estructura FCM Fuel (21).....	35
Figura 11 Proceso de ensamblaje de las barras de combustible (21) .....	36
Figura 12 Estructura del reactor MMR – USNC (21).....	38
Figura 13 Sistema de producción eléctrica con sales fundidas (21) .....	38
Figura 14 Relación área/potencia MMR.....	39
Figura 15 Diseño de la planta de 12 módulos de NuScale (24) .....	42
Figura 16 Layout planta NuScale (Edificio reactor y turbinas) (24).....	43
Figura 17 Reactor NuScale (24).....	44
Figura 18 Circulación por convección natural en NuScale (24) .....	45
Figura 19 Rejillas espaciadoras del núcleo (25) .....	46
Figura 20 Distribución 17x17 del núcleo, las barras de control se identifican con el gris .....	47
Figura 21 Vista transversal del edificio de contención de NuScale (24) .....	48
Figura 22 Esquema proceso producción electricidad NuScale (24) .....	49
Figura 23 Sistemas de seguridad del reactor (24) .....	50
Figura 24 Sistema pasivo de absorción de calor de los reactores (24).....	51
Figura 25 Barreras radiológicas (24).....	52
Figura 26 Layout planta IMSR – 400 (29) .....	54
Figura 27 Esquemas de la producción de potencia del IMSR – 400 (29) .....	55
Figura 28 Estructura del reactor IMSR – 400 (29).....	56
Figura 29 Sistema pasivo de enfriamiento del IMSR – 400 (29).....	60
Figura 30 Ejemplos de transportes para SMR (32) .....	64



# GLOSARIO

---

AGP: Almacenamiento Geológico Profundo

ATI: Almacén Temporal Individualizado

BWR: Boiling Water Reactor

FR: Fast Reactor

GRR: Grandes Reactores

IMSR: Integral Molten Salt Reactor

LCOE: Levelized Cost of Energy

LWR: Light Water Reactor

MMR: Micro Modular Reactor

MSR: Molten Salt Reactor

MTU: Metric Ton of Uranium

ORNL: Oak Ridge National Laboratory

PWR: Pressure Water Reactor

SMR: Small Modular Reactor

WCR: Water Cooled Reactor



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Las actuales centrales térmicas nucleares se construyen con la idea de hacerlas más grandes, de tal forma que consigamos obtener la máxima energía posible de cada reactor y así optimizar el uso de recursos. La potencia estándar que podemos encontrar hoy día en un reactor ronda los 1000 MWe, sin embargo, existen reactores de más de 1600 MWe. El desarrollo, construcción y montaje de estos reactores es prácticamente individualizado, lo que en ocasiones (no en general) conlleva retrasos en la puesta en marcha y sobrecostes en la instalación. Este tipo de inconvenientes hace parecer interesante la idea de construir reactores más pequeños.

El concepto de reactores pequeños de fisión no es algo nuevo de los últimos años, ya desde los años 50 se comenzaron a construir dichos reactores para propulsión marina como submarinos (Nautilus, 1954), portaaviones o rompehielos. Estos sistemas de propulsión tenían y tienen grandes ventajas como una gran autonomía, donde incluso se consigue que durante toda la vida útil del navío no sea necesario repostar. Además de la ventaja táctica de ser más silenciosos respecto a la alternativa de un motor de combustión interna. Sin embargo, estos reactores no son rentables fuera del contexto militar debido a su uso de combustible altamente enriquecido (más del 20%) y su bajo rendimiento.

Durante los últimos años ha surgido un gran interés por los reactores pequeños, los llamados SMR (en inglés, *Small Modular Reactor*). Actualmente existen más de 70 proyectos en desarrollo a lo largo del planeta, algunos en etapas de concepción, pero algunos otros como veremos más adelante, se encuentran en sus etapas finales previas a la comercialización.

Dentro de esos proyectos existen una gran variedad de diseños de SMR. Algunos son una versión reducida de los reactores actuales, pero otros son reactores con diseños innovadores no puestos en práctica previamente, lo que se denomina cuarta generación. Estos proyectos no se encuentran todos en el mismo estado de madurez, los diseños basados en las generaciones III/III+ se encuentran en un estado de desarrollo mayor, incluso en funcionamiento (sobre estas generaciones, sus diseños y características se hablará en apartados sucesivos). Los reactores de nueva generación que no se basan en tecnologías previas se encuentran en fase de desarrollo o concepción.

## 1.1 Aspectos Generales

Los reactores pequeños modulares se entienden como reactores con una potencia eléctrica de salida de entre 10 MWe y 300 MWe y con la capacidad de ser construidos en emplazamientos distintos a los de su destino final y ser transportados hasta allí. También existen en desarrollo reactores con una potencia de salida menos de 10 MWe, a los que nos referiremos como reactores micro modulares, MMR (en inglés, micro modular reactor).

Como hemos comentado al principio del texto existen aproximadamente 70 proyectos en torno a los SMR en la actualidad. Esto representa un aumento del 40% respecto al año 2018, lo cual nos indica una fuerte apuesta de los países por esta tecnología y la diferencia que puede marcar en los mixes eléctricos. De entre esos más de 70 proyectos, 25 tienen una fecha de despliegue prevista de aquí a 2030.

Debemos dejar una cosa clara y es que, aunque se haya aceptado de manera general el nombre de SMR para todos estos proyectos, tienen muchas diferencias entre ellos. Desde el tipo de refrigerante que usan, la geometría del combustible o su estado de desarrollo. También podemos diferenciarlos según el tipo de instalación, ya sea con un único reactor o con varios en una misma central. Encontramos casos donde estos reactores se instalan en barcos.

Además, no solo los podemos diferenciar por eso, sino por su uso ya que abren un gran abanico de oportunidades en aspectos no-eléctricos como la desalinización, producción de hidrógeno o la producción de calor.

Los diseños que tienen un nivel más avanzado de desarrollo son los basados en la generación II y III/III+ (LWR-SMR). Este tipo de reactores representan aproximadamente el 50 % de los proyectos que se desarrollan en la actualidad. El otro 50 % corresponde a la generación IV, donde por ejemplo encontramos otros tipos de refrigerantes, como: gas, metal líquido o sales fundidas. Estos reactores no tienen el mismo nivel de desarrollo y se siguen investigando en ellos.

El primer SMR, el Akademik Lomonosov, se instaló en una unidad flotante de la Federación Rusa y se explota comercialmente desde mayo de 2020 con una capacidad de 70 MWe.

El tamaño más reducido de estos reactores hace que entre en juego la construcción en serie. El diseño de los SMR se diferenciará respecto a las grandes centrales nucleares, en su grado de modularización, simplicidad y una gran estandarización. Además, esta construcción en serie favorece otros factores aparte del económico y es el grado de control en la calidad, ya que se realizará en un espacio regulado, reduciendo errores y mejorando la capacidad de solventar inconvenientes.

Debemos destacar que cuando hablamos de reactores pequeños no nos referimos a un dispositivo de “mano”, por ejemplo; la empresa NuScale Power en EE. UU., la cual lleva unos de los proyectos más avanzados, trabaja en el diseño de un reactor de 23 metros de altura y 4,5 metros de ancho, lo cual no es precisamente la idea de pequeño que puede tener uno formulada en la cabeza, sin embargo, sí que son dispositivos pequeños si los comparamos con los reactores actuales y con cualquiera de sus sistemas como los generadores de vapor, donde el tamaño llega a ser similar. Pero este tamaño hace posible que el reactor sea transportado por carretera hasta el lugar de puesta en marcha. Estos lugares podrán ser lugares remotos para apoyar la red eléctrica o



incluso a infraestructuras de centrales térmicas de carbón o gas. Esto podrá ser posible gracias a que los SMR llevan incorporados todos los sistemas para funcionar independientemente, por lo que se podrían adaptar instalaciones ya construidas a esta fuente de energía, algo sin lugar a duda muy interesante. Esto en España podría ser una opción, ya que disponemos de una gran potencia instalada respecto al pico de demanda medio, por lo que llegado el momento se podrían reconvertir centrales térmicas convencionales para adaptarlas a estos dispositivos.

En cuanto a los costes, el menor tamaño y la idea de realizarlos en serie, hará reducir los costes frente a una central nuclear tradicional, además de ser más atractivo para empresas e inversores debido a un menor riesgo financiero, debido a ser una opción más económica. Y no solo eso, la introducción de esta tecnología al mercado permitirá “democratizar” la energía nuclear, por lo que zonas o países que no tenían acceso previo a estas centrales térmicas tendrán una nueva oportunidad para añadirlas a sus mixes eléctricos y así aumentar el mercado y consigo los beneficios económicos.

Aun así, quedan obstáculos por superar, como una legislación unificada. Ya que, si se pretende la producción en serie, no es posible la coexistencia de muchos modelos en el mercado. De los 70 actuales y de los que irán surgiendo solo quedarán los más competitivos. Y así unificar normativa y construcción. Todo lo expuesto se tratará en profundidad más adelante (1).

## 1.2 Generaciones

En general los grandes avances científicos de la historia vienen generados por un conflicto bélico y no es por otra cosa que por la ambición de los dirigentes de cada país de sobreponerse a sus adversarios a cualquier coste. Es precisamente este derroche económico el que propicia el “rápido” desarrollo de nuevas tecnologías nunca vistas y es así como la energía nuclear deja el plano de la teoría hacia la práctica, durante la Segunda Guerra Mundial.

### 1.2.1 La primera pila atómica

El inicio de la era nuclear tiene una fecha muy concreta, el 2 de diciembre de 1942 a las 15:25, en el graderío oeste del Stagg Field de Chicago, momento en el que se consiguió por primera vez en la historia de forma artificial, provocar y mantener una reacción nuclear en cadena.

Este primer reactor nuclear fue la pila CP-1, de grafito y uranio, con una estructura que podemos ver en la Figura 1. Fue desarrollada por un gran equipo de científicos liderados por el italiano Enrico Fermi.

El desarrollo de esta pila se hizo bajo el amparo del Manhattan Engineer District (Proyecto Manhattan). Dicho proyecto había negociado una inversión millonaria con la “E.I. du Pont de Nemours and Co” para el diseño, construcción y explotación de una planta nuclear basada en la pila de Chicago, lo que aumentaba los intereses en juego del proyecto (2).

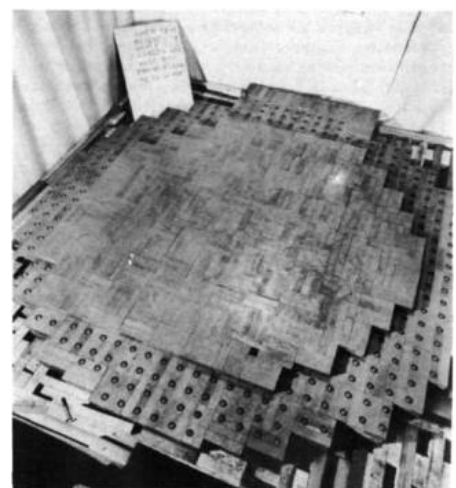


Figura 1 Pila CP-1 (2)

Tras este primer reactor se desarrolló el reactor de grafito X-10, el cual se construyó en menos de 10 meses en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, fue el segundo reactor artificial del mundo y el primero en ser diseñado para una operación continuada. No debemos olvidar el contexto en el que se desarrollan estos primeros

reactores, donde uno de sus principales intereses estaba en los productos generados por la fisión, como el plutonio-239, para ser usado posteriormente en bombas atómicas (3). Al año siguiente, 1944, se finalizaría el primer reactor del mundo, el reactor B en Hanford Site, el cual tenía como objetivo la producción de plutonio a gran escala. El interés por el plutonio venía originado por un hallazgo años atrás, en 1941, cuando Glenn Seaborg (universidad de California Berkeley) descubrió que el plutonio-239 era más probable que fisionase que el uranio-235, de ahí el interés del Proyecto Manhattan para su fabricación (4).

Los siguientes prototipos desarrollados tras este primer avance a lo largo de las décadas de los 50 y 60, serán los llamadas: reactores de generación I.

### 1.2.2 Generaciones posteriores

Desde aquella pila hasta la actualidad ha habido grandes avances en el campo de la producción eléctrica nuclear. Hablamos de cerca de 80 años de constantes descubrimientos y los actuales reactores poco se parecen a la CP-1.

En la actualidad los reactores dominantes que producen electricidad a lo largo de todo el planeta son los llamados: Reactores de Generación II. Estas centrales son aquellas construidas entre los 70 y 90, como es el caso de los siete reactores activos en el territorio español.

Tras esto reactores vienen las centrales de generación III/III+, son aquellas cuyo desarrollo y diseño está basado en la anterior generación y en la experiencia de esos años, aplicando mejoras no solo a los nuevos diseños sino también a las centrales ya construidas. Dichas mejoras involucran sobre todo a los sistemas de seguridad, fiabilidad y operabilidad de las instalaciones. Este tipo de centrales son las que se construyen en la actualidad. Estos incluyen sistemas de seguridad pasivos, accionados por convección natural o la propia gravedad, los cuales actúan si es necesario sin ningún tipo de corriente externa. En la Figura 2 podemos ver el avance de las generaciones desde finales de los años 40 hasta la actualidad.

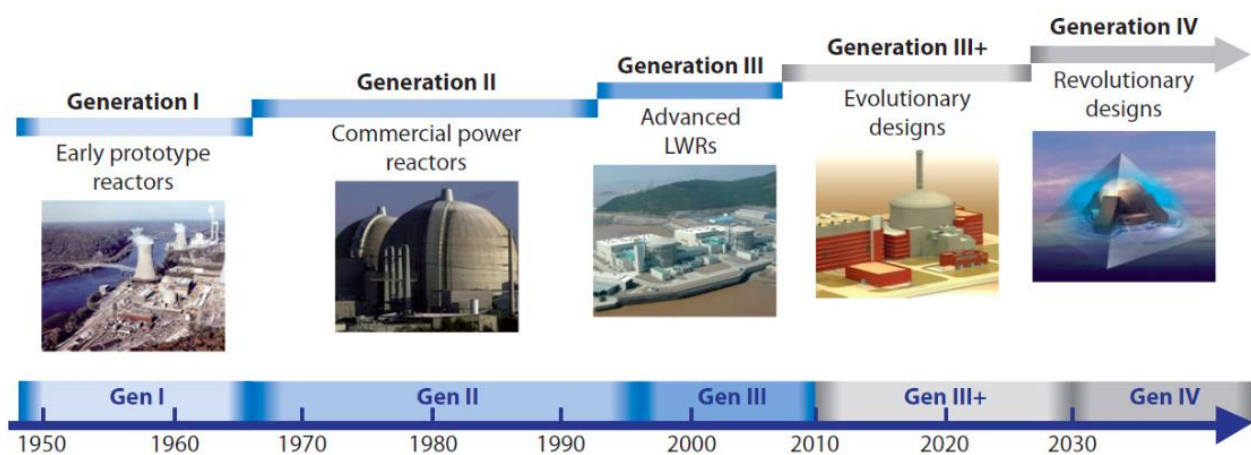


Figura 2 *Timeline* del desarrollo de los reactores nucleares

Respecto a los reactores que se construyen actualmente los podemos dividir en dos tipos: reactores evolutivos de agua en ebullición y reactores avanzados de agua a presión (5).

### 1.2.3 Generación IV

La generación IV se espera que comience su vida comercial en los próximos 30 o 40 años. Estos suponen un gran avance respecto a los anteriores, sus diseños se basan en los siguientes principios:

- **Sostenibilidad:** se debe promover una vida útil larga y el aprovechamiento máximo del combustible en todas las centrales del mundo, con el fin de reducir el volumen de residuos
- **Economía:** tienen que ofrecer más ventajas económicas en el sector que sus competidores durante su operación
- **Seguridad y fiabilidad:** se debe reducir al mínimo la probabilidad de incidentes y si ocurriese un posible evento, que las consecuencias fuesen cada vez más reducidas
- **Resistencia a la proliferación y protección física:** deben construir una vía que dificulte el uso de los materiales involucrados en la fisión para fines no pacíficos.

Uno de los aspectos más interesantes de esta generación es que los reactores no solo pueden estar orientados a la producción de energía eléctrica, podrían tener otras aplicaciones. Estas podrían ser; la generación de hidrógeno, grandes sistemas de transporte o producción de calor.

Actualmente hay dos iniciativas para desarrollar estos diseños:

- **GIF (Generation IV International Forum):** en esta participan EE. UU. y Francia, además de otros países colindantes y de oriente. Esta coordinada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).
- **INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles):** está amparada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Participan la Unión Europea y Rusia entre otros países.

Los principales diseños en desarrollo e investigación son los que siguen:

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

Ambos programas internacionales incluyen el desarrollo de una nueva familia de reactores nucleares; los Reactores Modulares Pequeños (SMR, en inglés Small Modular Reactor), con potencias eléctricas de alrededor de 300 MWe, los cuáles serán el objeto de estudio de este documento y de los que se hablarán extensamente en lo sucesivo (5).

### 1.3 Situación y perspectiva de la energía nuclear en el mundo

La producción de electricidad con energía nuclear a lo largo de la historia ha producido tanto beneficio como polémica. Sin embargo, debemos destacar que la mayoría de los países avanzados del mundo está apostando por la energía nuclear y su desarrollo. Cada vez más se va reconociendo el gran papel que desempeña la energía nuclear en la mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible. Se estima que en los últimos 50 años la energía nuclear ha evitado la emisión de entre 70 Gt y 78 Gt de CO<sub>2</sub> (6)

En dicho papel los GRR (Grandes Reactores) y SMR tiene un gran futuro en la descarbonización del sector de la calefacción, como la calefacción urbana, el calor industrial y la síntesis de combustible (también el hidrógeno). Las temperaturas de funcionamiento de las centrales nucleares rondan los 300°C, mientras que los procesos de calefacción urbana y desalinización de agua requieren de unos 150°C. Un ejemplo de esto es la central de Haiyang en la provincia de Shandong (China), que en 2020 comenzó a proveer calefacción urbana a las zonas colindantes. Evitando el uso de 23.200 toneladas de carbón al año, reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> en 60.000 toneladas.

El rendimiento térmico de las centrales ronda el 30 % (variando según el tipo de reactor) cuando su fin es la producción eléctrica, en la Figura 3 podemos observar el porcentaje de reactores que tienen un fin complementario o distinto a la pura producción eléctrica y en que países se distribuyen.

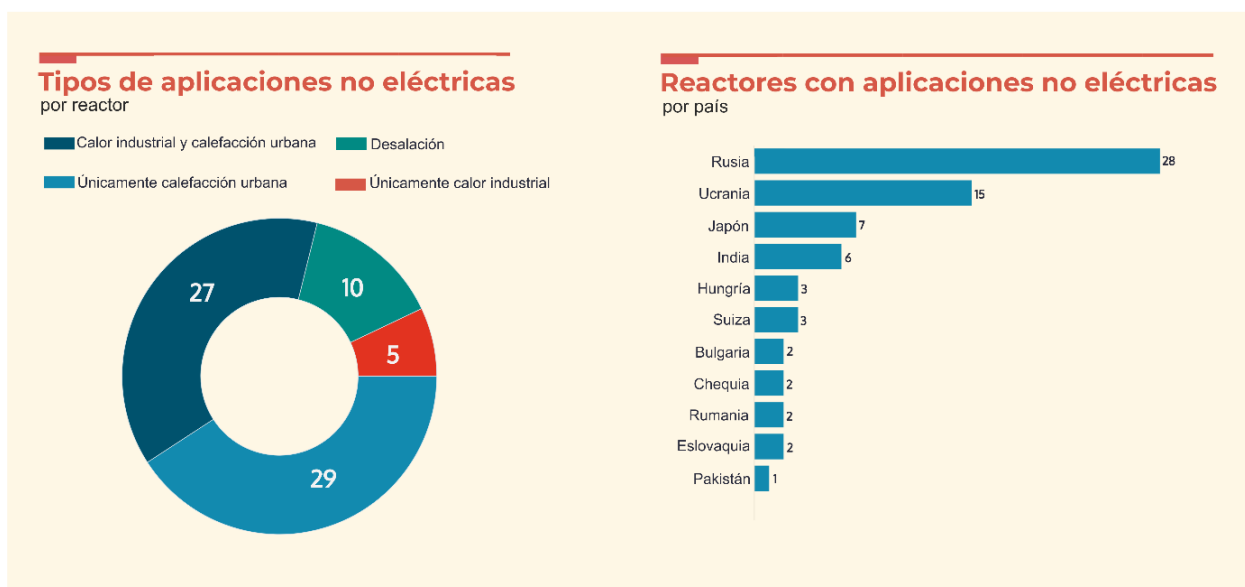
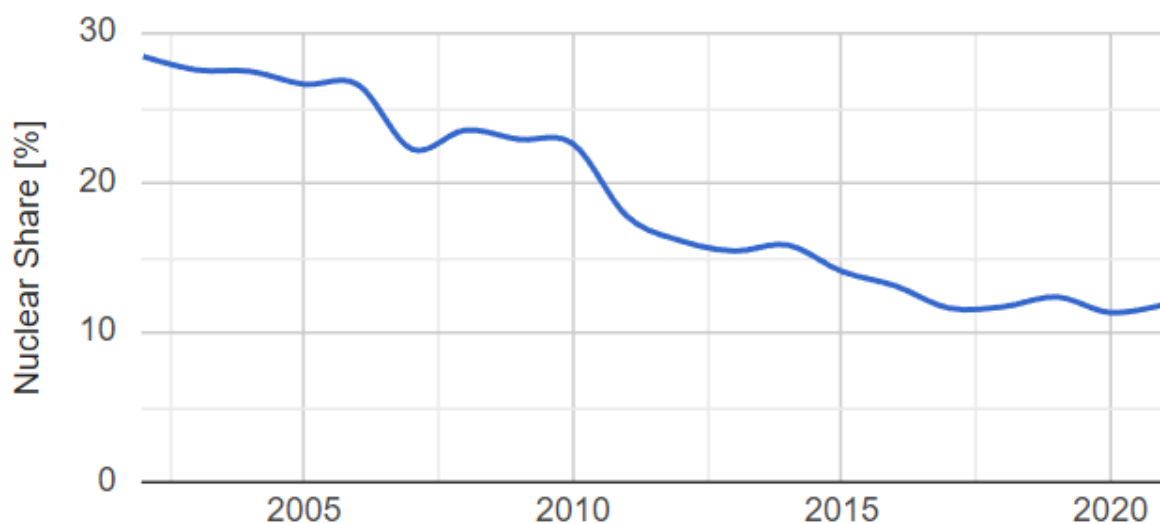


Figura 3 Distribución de reactores con fines distintos y/o adicionales a la producción eléctrica (6)

Una de las opciones que más futuro parece tener es la combinación de la energía nuclear con las energías renovables, con el objetivo una vez más de la máxima descarbonización posible del mercado eléctrico. Estos sistemas híbridos aprovechan los beneficios de cada tecnología y su modalidad de funcionamiento para suministrar electricidad fiable, sostenible y asequible. Además de energía con bajas emisiones de carbono respecto a otros sectores. Esta combinación sería además de gran utilidad para todas aquellas aplicaciones antes descritas con fines no-eléctricos.

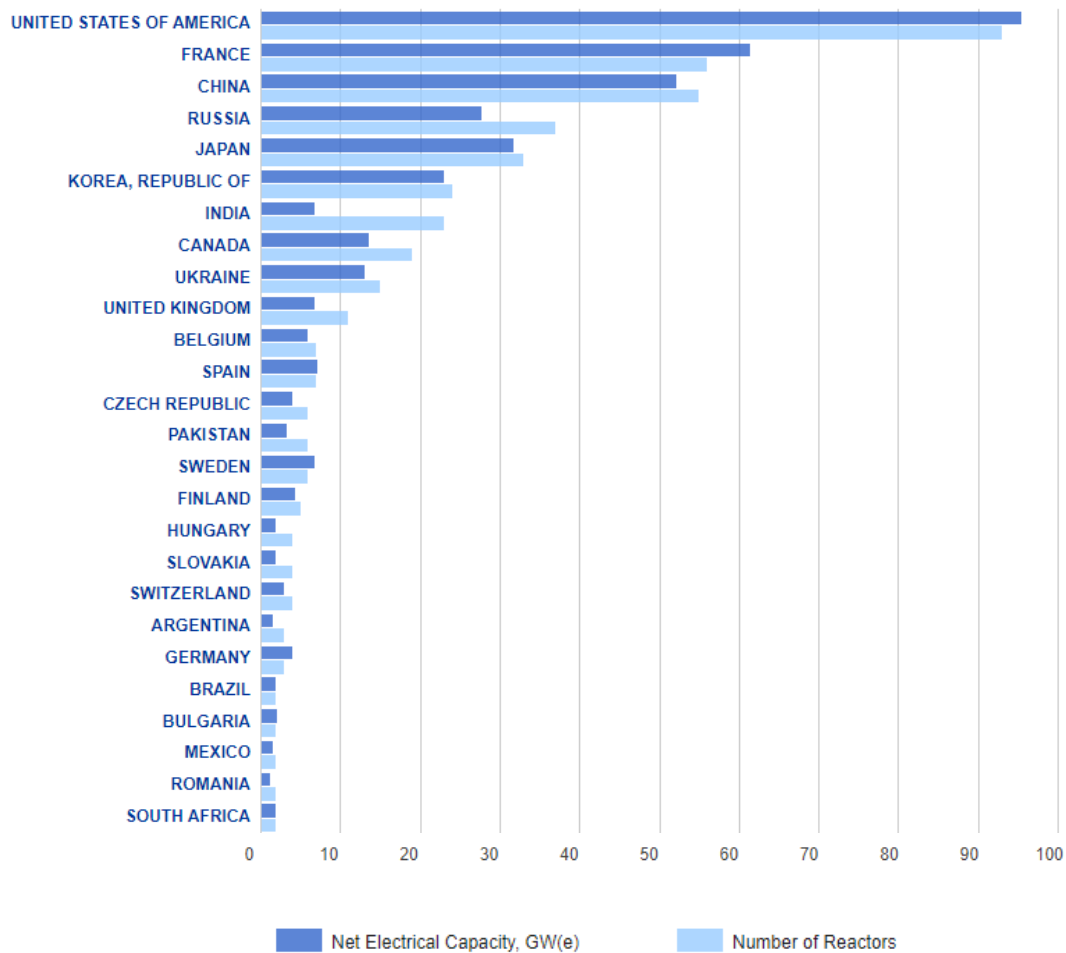
Por otra parte, nos encontramos algunos casos (excepcionales) de países con una política claramente no nuclear. Entre estos países podemos destacar Alemania.

En el caso concreto de Alemania, en 2011 anunció un plan llamado “Energiewende” para cerrar todas las centrales nucleares en torno al año 2022. La entonces canciller Angela Merkel tras el accidente de Fukushima cerró de forma inmediata los ocho reactores más antiguos, comenzando así el proceso de clausura y apagón nuclear en el país. Esta decisión es ampliamente aceptada por los ciudadanos del país, aproximadamente el 75% (7). Se espera que este proceso se culmine durante este año (2022) y el siguiente. Actualmente Alemania obtiene el 7 % de la nuclear, frente al 22,2% de 2010, antes del comienzo del proceso de cierre, podemos observar claramente esa tendencia en la Gráfica 1. Únicamente quedan en funcionamiento tres reactores en el país de los 33 que han construido a lo largo de su historia.



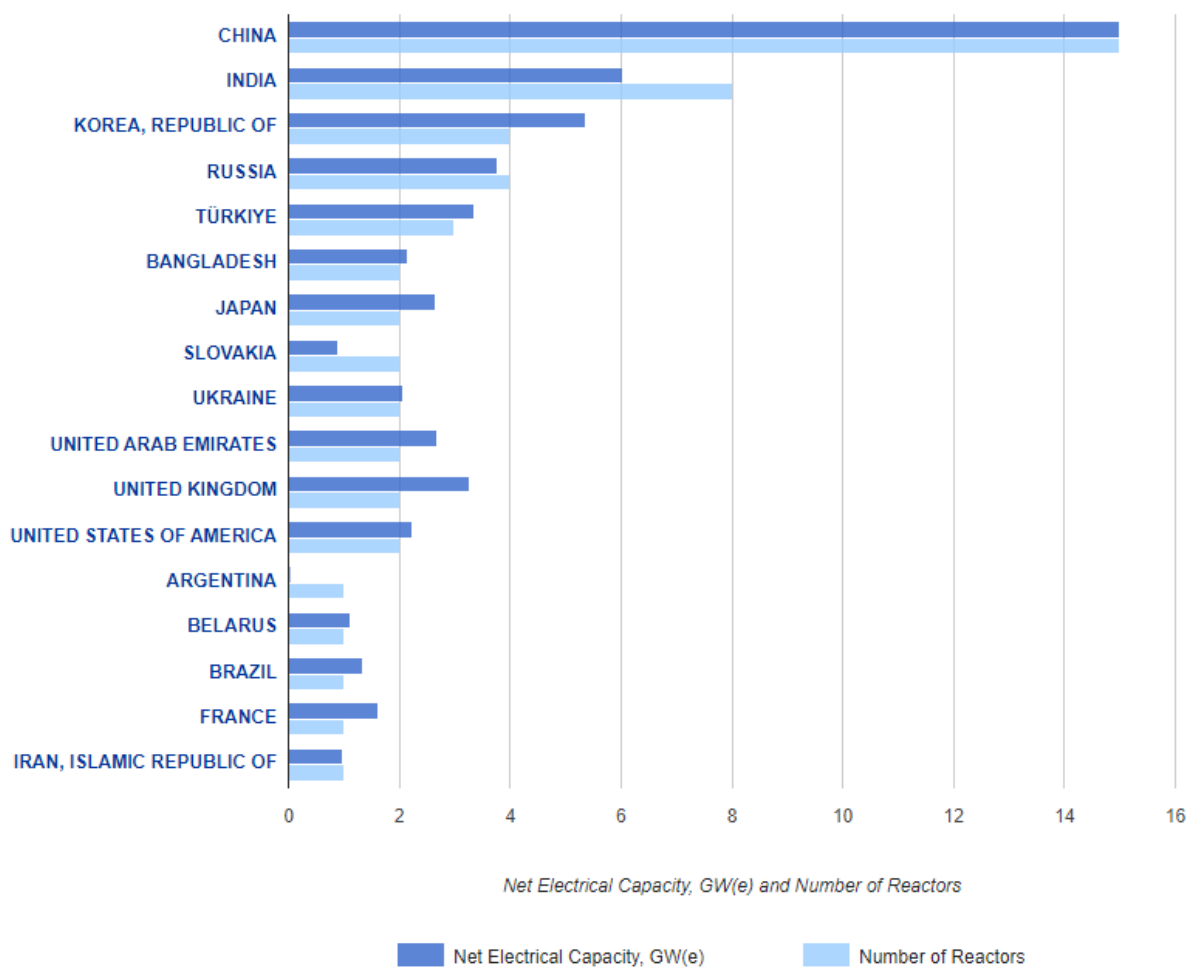
Gráfica 1 Evolución de la energía eléctrica cubierta por la nuclear en Alemania (7)

Sin embargo, como hemos indicado previamente la tendencia general es hacia el fomento de la construcción y desarrollo de nuevos reactores, tanto es así que hay actualmente 441 reactores nucleares en operación a lo largo del mundo, esto representa un total de 393.853 MWe (8). Todos estos reactores se distribuyen como se muestra en la Gráfica 2. De entre estos reactores, el 89,5% son moderados y refrigerados por agua ligera, el 6% moderados y refrigerados por agua pesada, el 2% refrigerados por agua ligera y moderados por grafito (LWGR) y el otro 2% son reactores refrigerados por gas. Queda un 0,5 % que provenía de tres reactores refrigerados por metal líquido (6)



Gráfica 2 Distribución potencia instalada frente número de reactores en el mundo (9)

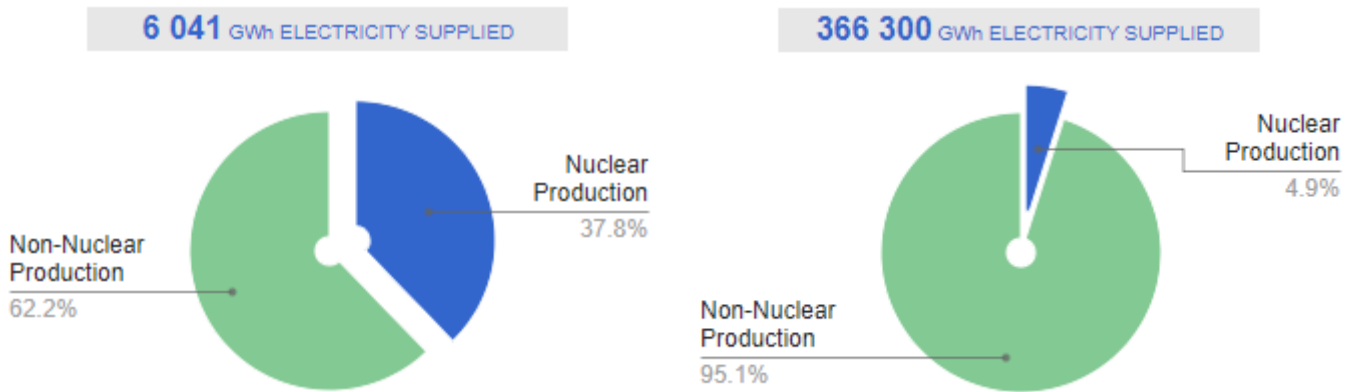
Además de encontrarnos con un gran número de reactores ya construidos, se están construyendo 53 reactores más, con una capacidad esperada de 54.517 MWe. Estos reactores en construcción se distribuyen como muestra la Gráfica 3.



Gráfica 3 Reactores en construcción frente potencia en cada país (9)

Observamos en la Gráfica 3 como hay una pujante apuesta en las zonas de Asia del este, como China, India o la República de Corea. Debemos destacar que únicamente China está construyendo 15 reactores, lejos de los números que manejan otros países como Reino Unido o Francia.

Claro está, es importante saber qué porcentaje de la demanda eléctrica es cubierta por los reactores nucleares del país, ya que hay países que con pocos reactores cubren una gran parte, como Eslovenia (con un único reactor) como vemos en la Gráfica 4 u otros con un gran número de reactores que cubren un porcentaje muy reducido como China.



Gráfica 4 Distribución eléctrica Eslovenia (10) y en China (8)

## 1.4 Situación y perspectiva de la energía nuclear en España

El comienzo del programa nuclear en España empezó en 1960, con la puesta en marcha de la primera central nuclear; José Cabrera “Zorita”, en Guadalajara. España cuenta con instalaciones a lo largo de su territorio que cubren prácticamente todo el ciclo del combustible, disponemos de siete reactores nucleares: Almaraz I y II, Ascó I y II, Cofrentes, Trillo y Vandellós II, además de una fábrica de combustible nuclear en Juzbado y un centro de almacenamiento de residuos radiactivos. Los cuales se distribuyen por el territorio como vemos en la Figura 4.

En conjunto los siete reactores poseen una potencia neta de 7.117 MWe, lo que significa en torno al 6,31 % de la potencia instalada en el país. Concretamente en 2021 los reactores produjeron 54.040 GWh, lo que resultó en 20,8% de la producción total del país y de manera constante los últimos años, la electricidad producida representa aproximadamente el 30% de la potencia generada libre de CO<sub>2</sub>.

En España, la vida útil de una central nuclear no tiene un plazo fijo, las autorizaciones para su explotación se renuevan tras la evaluación del Consejo de Seguridad Nuclear y la concesión por parte del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).

Respecto al combustible gastado, las centrales lo almacenan en unas piscinas construidas en las instalaciones con ese propósito, en el momento que estas queden completadas se realizará el almacenamiento en ATIs (Almacenes Temporales Individualizados) en seco. Existen ATIs en las centrales de José Cabrera (en desmantelamiento), Sta. M.<sup>a</sup> Garoña (en desmantelamiento), Trillo, Ascó, Almaraz y Cofrentes (inaugurado en junio de 2021). A finales del año 2021 el número de elementos combustibles irradiados almacenados era de 17.062, de los cuales 14.601 están en piscinas y 2.461 en ATIs (11).



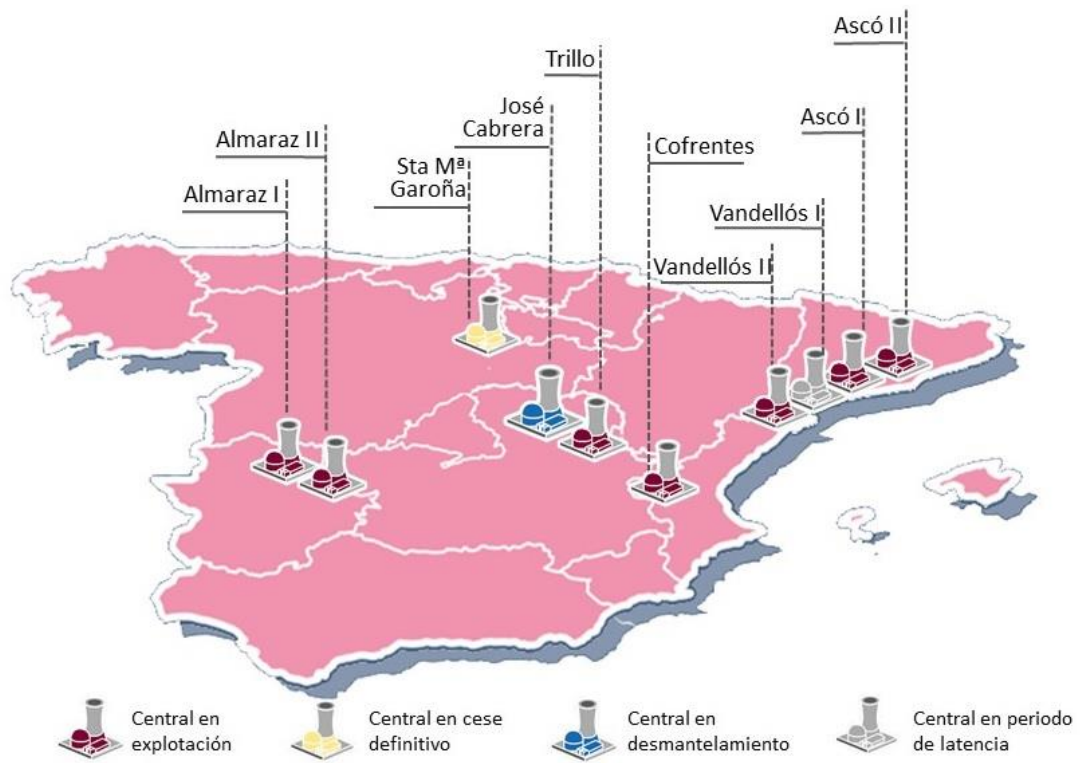


Figura 4 Centrales nucleares en España (12)



## 2 SMALL MODULAR REACTOR

---

**E**n este capítulo trataremos en que consiste esta tecnología en desarrollo, como es su estado actual en el mundo y los diferentes proyectos que se están llevando a cabo. También veremos qué ventajas supone y que retos quedan por superar tanto a nivel técnico como legislativo. Como hemos comentado previamente a pesar de que todos los proyectos reciben la misma denominación como SMR, no todos los diseños siguen los mismos conceptos, por lo que haremos una clasificación para distinguirlos.

Los SMR se pueden clasificar de diversas maneras debido a su gran variedad de diseños, sin embargo, escogeremos cinco categorías para agrupar los existentes tipos:

- Reactor único: son reactores de agua ligera, LWR y que pueden ser tanto PWR (lo más común) o BWR. Se instalarían como unidades únicas para reemplazar el uso de combustible fósil en instalaciones de poca potencia.
- Multi-reactor: también son reactores LWR y se utilizarían como alternativa en complejos de mayor potencia, al poder instalarse varios reactores en serie.
- Reactor móvil/transportable: pretenden ser reactores que se puedan mover fácilmente entre varias localizaciones. En esta categoría incluimos también los reactores flotantes.
- Reactor Generación IV: estos reactores no están basados en los LWR previos, sino en las tecnologías y conceptos que se investigan y desarrollan a lo largo del mundo y que denominamos Gen. IV.
- Reactores Micro Modulares: son reactores diseñados con menos de 10 MWe de capacidad. Su diseño pretende que sean prácticamente autónomos y más fáciles de transportar que los SMR. Pueden estar basados en reactores LWR, pero en general se desarrollan con una amplia gama de nuevas técnicas, incluyendo la Gen. IV. Su principal uso será para zonas aisladas que necesiten una fuente de energía y que no requieran una gran potencia.

### 2.1 ¿Qué es un reactor modular pequeño?

Los reactores modulares pequeños (SMR) son reactores nucleares con capacidad de hasta 300 MWe, se caracterizan por:

- Pequeños: ocupan una fracción del volumen que ocupa un reactor nuclear convencional con una potencia de ~1000 MWe
- Modulares: esto se refiere a que todos los sistemas y componentes son montados en un mismo lugar y posteriormente son trasladados a su lugar de funcionamiento como un único elemento.

- **Reactores:** significa que aprovechan la energía generada por la fisión nuclear para la producción de energía eléctrica.

## 2.2 SMR en el mundo

Como ya se ha expuesto previamente hay más de 70 proyectos en torno a los SMR a lo largo de todo el mundo, pero claro está no todos los países han apostado igual por ello ya sea por su situación económica o por sus políticas en torno a la energía nuclear. En la Figura 5 observamos como los países que lideran los proyectos son, en occidente; Canadá y EE. UU. En oriente encontramos; Rusia, Japón y China.

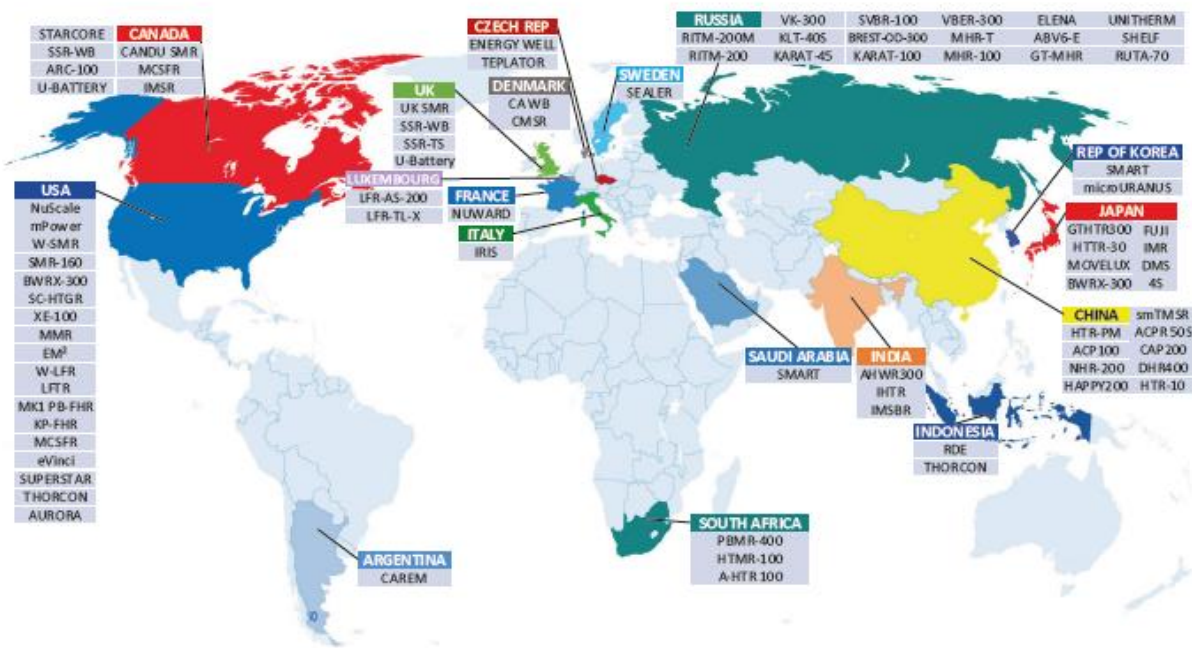


Figura 5 Distribución de los distintos proyectos de SMR en el mundo

Como ya hemos dejado claro, los proyectos pueden ser muy distintos entre ellos, desde el número de reactores instalados, su portabilidad, así como su combustible, refrigerante o potencia. Para hacer un pequeño resumen de los principales proyectos en el mundo y sus características se puede observar la Tabla 1.

Design	Net output per module (MWe)	Number of modules (if applicable)	Type	Designer	Country	Status
<b>Single unit LWR-SMRs</b>						
CAREM	30	1	PWR	CNEA	Argentina	Under construction
SMART	100	1	PWR	KAERI	Korea	Certified design
ACP100	125	1	PWR	CNNC	China	Construction began in 2019
SMR-160	160	1	PWR	Holtec International	United States	Conceptual design
BWRX-300	300	1	BWR	GE Hitachi	United States-Japan	First topical reports submitted to the US NRC and to the CNSC as part of the licensing process
CANDU SMR	300	1	PHWR	SNC-Lavalin	Canada	Conceptual design
UK SMR	450	1	PWR	Rolls Royce	United Kingdom	Conceptual design
<b>Multi-module LWR-SMRs</b>						
NuScale	50	12	PWR	NuScale Power	United States	Certified design. US NRC design approval received in August 2020
RITM-200	50	2	PWR	OKBM Afrikantov	Russia	Land-based nuclear power plant – conceptual design
Nuward	170	2 to 4	PWR	CEA/EDF/Naval Group/TechnicAtome	France	Conceptual design
<b>Mobile SMRs</b>						
ACPR50S	60	1	Floating PWR	CGN	China	Under construction
KLT-40S	35	2	Floating PWR	OKBM Afrikantov	Russia	Commercial operation
<b>Gen IV SMRs</b>						
Xe-100	80	1 to 4	HTGR	X-energy LLC	United States	Conceptual design
ARC-100	100	1	LMFR	Advanced Reactor Concepts LLC	Canada	Conceptual design
KP-FHR	140	1	MSR	Kairos Power	United States	Pre-conceptual design
IMSR	190	1	MSR	Terrestrial Energy	Canada	Basic design
HTR-PM	210	2	HTGR	China Huaneng/CNEC/Tsinghua University	China	Under construction
EM2	265	1	GMFR	General Atomics	United States	Conceptual design
Stable Salt Reactor	300	1	MSR	Moltex Energy	United Kingdom	Pre-conceptual design
Sodium	345	1	SFR	Terrapower/GE Hitachi	United States	Conceptual design
Westing-house Lead Fast Reactor	450	1	LMFR	Westinghouse	United States	Conceptual design
<b>MMRs</b>						
eVinci	0.2-5	1	Heat pipe reactor	Westinghouse	United States	Basic design
Aurora	2	1	LMFR	Oklo	United States	Licence application submitted to the US NRC
U-Battery	4	1	HTGR	Urenco and partners	United Kingdom	Basic design
MMR	5-10	1	HTGR	USNC	United States	Basic design

Tabla 1 Características generales de los principales proyectos (13)

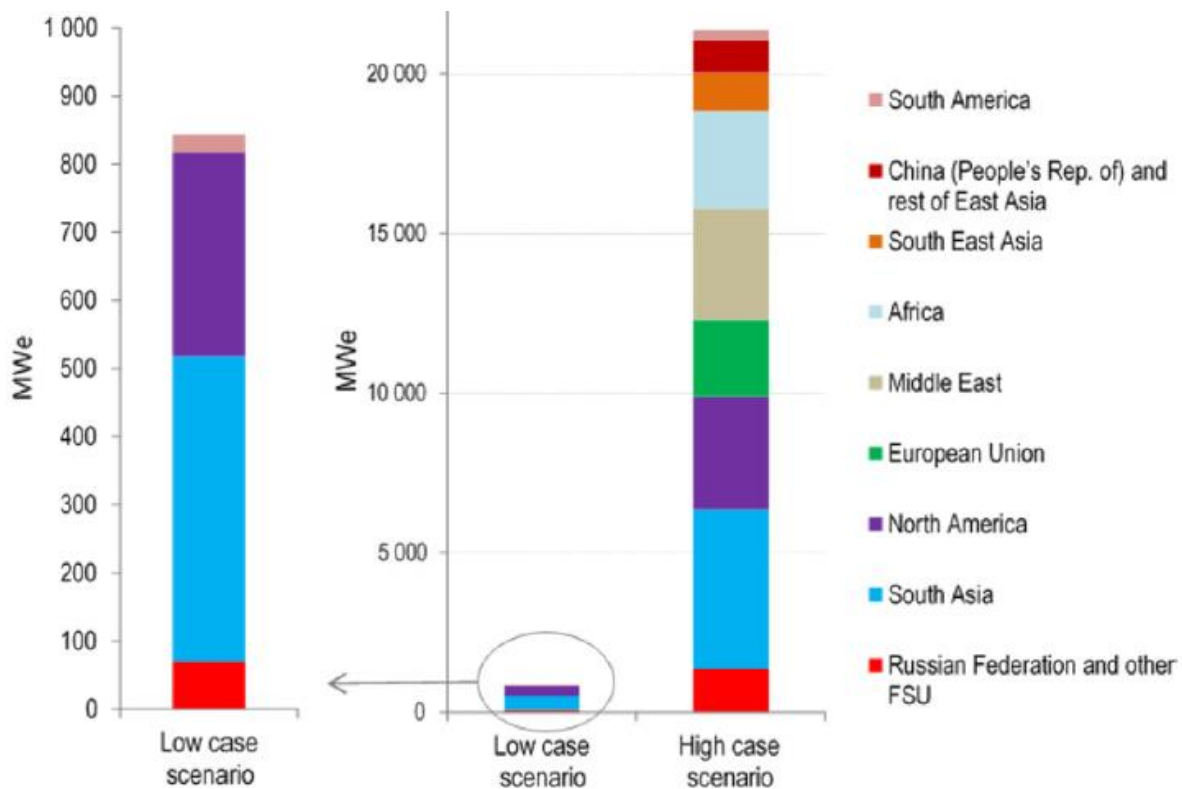
### 2.2.1 Despliegue estimado de los SMR

La Nuclear Energy Agency (NEA), realizó un estudio del mercado que podrían generar los SMR hasta 2035. Se describieron dos posibles escenarios; uno con un gran desarrollo de la tecnología y otro con un desarrollo menor, es decir, uno más optimista y otro más conservador (13).

En el escenario optimista, se asume que se consiguen todas las licencias para establecer las fábricas y las cadenas de suministro y se completa el ciclo de combustible de los modelos seleccionados.

En el caso más conservador, se llega a la conclusión de que los SMR son caros de construir y operar y por lo tanto solo un número limitado de estos reactores se completarían.

Estos dos casos tienen en cuenta diversos factores como: el número de demandantes en el mercado, el desarrollo de las redes eléctricas, el avance de las energías renovables, la construcción de nuevos reactores, además de las políticas nucleares de cada país. En el caso optimista se estima que se generarían hasta 21 GWe en 2035 únicamente producidos por SMR, lo cual significaría el 3 % de la energía nuclear instalada en el mundo. Si esto fuese así entre 2020 y 2035 el 9 % de las nuevas instalaciones nucleares serían SMR. Sin embargo, en el caso más conservador en 2035 solo se instalaría 1 GWe y principalmente producido por prototipos en países que ya disponen de un programa nuclear. Podemos observar ambas tendencias y como se distribuirían por zonas en el mundo en la Gráfica 5 (13).



Gráfica 5 Capacidad estimada de los SMR en 2035 (13)

A partir de 2035 puede que el mercado en torno a los SMR avance con más rapidez, en vista a conseguir los objetivos de descarbonización de la producción eléctrica en el mundo. Además, será importante concretar el mercado disponible para los SMR de tal forma que podamos estimar su viabilidad a largo plazo.

## 2.3 Diseño y características de los SMR

El reducido tamaño de estos reactores supone muchas ventajas respecto a un reactor de tamaño convencional, a pesar de la pérdida de rendimiento térmico de la instalación, una vez más debido a la diferencia de tamaños.

Entre esas ventajas encontramos los siguientes puntos:

- **Diseños integrales;** esto quiere decir que dicho sistema integral incluye todos los componentes del sistema de suministro de vapor dentro de la misma vasija, además de evidentemente el propio reactor nuclear y sus respectivos sistemas. Esta configuración donde incluimos la totalidad del sistema primario de refrigerante dentro de la vasija es mayor que si lo instalásemos fuera como es común en las instalaciones actuales. Sin embargo, esta configuración conlleva en una mayor seguridad de la propia instalación, debido a que son sistemas más simples y fáciles de operar y mantener.
- **Seguridad;** una menor potencia de salida y una mayor relación superficie-volumen, debido a núcleos más pequeños aumenta la efectividad de los sistemas pasivos de seguridad. Por ejemplo, muchos reactores LWR tiene grandes cantidades de agua en circulación para el enfriamiento del reactor en cualquier circunstancia. Sin embargo, la mayor efectividad de los SMR en los sistemas pasivos ayuda a realizar diseños más sencillos y facilita la operación y mantenimiento en la propia instalación.
- **Tamaño del núcleo;** un menor tamaño del núcleo tiene beneficios tanto dentro como fuera de la instalación. En la propia instalación necesitaremos menos barreras frente a la radiación generada, además de que la dosis a la que se ven expuestas los trabajadores será menor. Fuera de la instalación, al ser menor la cantidad de combustible que se maneja, la probabilidad de un accidente se reduce y la hipotética radiación emitida en un evento así sería menor. Esto puede significar que algunos SMR puedan colocarse cerca de las zonas que lo necesiten.
- **Fabricación y modularidad;** El menor tamaño de los SMR implica una mayor facilidad en el ensamblaje y desarrollo de sus componentes. Además de cómo son instalados y transportados. Haciendo todas estas tareas mucho más fáciles de realizar

## 2.4 Tipos de SMR

Como hemos explicado previamente la variedad de tecnologías implementadas en los nuevos diseños de los SMR es casi tan extensa como el número de proyectos llevados a cabo, algunos basados en tecnologías ya utilizadas hoy en día y otros basados en tecnologías nuevas o en desarrollo (Generación IV), los cuales serán el objeto de estudio en este apartado, debemos destacar que estos nuevos reactores se podrán encontrar en un futuro tanto en los SMR como en GRR. No se incluye a los reactores micro modulares (MMR) ya que serán tratados independientemente en el apartado Micro Modular Reactor (14).

### 2.4.1 Reactores rápidos (FR)

Este tipo de reactores son muy prometedores, trabajan con un ciclo del combustible cerrado, donde se espera que puedan extraer 60 o 70 veces más energía del uranio que los reactores térmicos, esto contribuye a reducir las reservas de plutonio, además de producir menos calor residual, lo que conlleva a un menor volumen de aislante y barreras tanto térmicas como radiactivas. Tendrán también una mayor eficiencia y el uso del propio reactor promete mejorar la seguridad respecto a reactores de generaciones anteriores, aunque aún no se ha probado que esto sea así.

Debido a como son concebidos los reactores rápidos, son muy flexibles y pueden ser diseñados como “breeders”, “burners” o como reactores para fines generales. Si son diseñados como “breeders” el reactor producirá más combustible del que consume, mientras que si se diseñan como “burners” se reducirá el volumen, el calor generado y la vida de los residuos generados, por lo tanto, se minimizarán significativamente los requerimientos legales y técnicos de la instalación. En ambos casos, para ser efectivos, se requiere ciclos cerrados de combustible, incluyendo el reprocesamiento de este.

En el caso de los reactores para propósitos generales el burn-up es mayor, tienen un ciclo del combustible mayor y las temperaturas manejadas por los refrigerantes son mayores. Este tipo de reactores son muy adecuados para la producción de electricidad o para aplicaciones no eléctricas. El burn-up es un término que se usará a lo largo del documento y se refiere a la cantidad de energía que se puede extraer del combustible nuclear, es una medida de su consumo, normalmente se mide el megavatio-día por tonelada-métrica de uranio [MWd/MTU] (15).

Debido a la flexibilidad ya comentada de estos reactores, se pueden adaptar con facilidad al país donde se instalen, a sus políticas y necesidades. Por ejemplo, si el objetivo es reducir el consumo de uranio natural, lo cual podría ocurrir en países donde se espera mantener un gran número de centrales nucleares, en dicho caso se podrán diseñar como “breeders”. Por otro lado, si el objetivo es reducir el plutonio como producto de fisión o reducir el número de requerimiento para la construcción de la planta, se podrá diseñar como “burners”. Por ello y dependiendo del país en el que se desarrolle el programa en torno al FR el punto de partida o los objetivos pueden ser muy diferentes. En Japón se desarrolla este tipo de reactores debido principalmente a la falta de fuentes de energía tradicionales. En contraposición nos encontramos el caso de Rusia, un país con suficiente combustible fósil tanto para la producción nacional como para exportar, sin embargo, su interés en desarrollar reactores FR se centra en mantener el liderazgo tecnológico en el mundo, además para la posible exportación de reactores, es decir, para fines económicos.

El mayor reto de los FR es reducir el coste de inversión que actualmente se estima entre un 30 y un 50 % superior respecto a los GGRR actuales. Además, debemos destacar que la operación y mantenimiento de estos reactores supone un mayor reto que un reactor clásico, lo cual hará necesario operarios más cualificados y por lo tanto una legislación más estricta.

#### **2.4.1.1 Reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR)**

La tecnología más avanzada en torno a los FR son los reactores refrigerados por sodio, ya que en torno a esta tecnología hay más experiencia, adquirida a través del diseño y la construcción y operación experimental, la demostración y la puesta en marcha de unidades comerciales, las cuales ya funcionan en numerosos países como; China, Francia o Rusia.

Los SFR usan sodio líquido como refrigerante primario, permitiendo una gran potencia frente a un reducido volumen de refrigerante además de operar a una baja presión. El sodio reacciona de manera explosiva con el agua, por lo que es necesario un sistema estanco para el refrigerante. Las potencias manejadas por estos reactores pueden ir desde los 50 MWe hasta más de 1500 MWe, lo que lo convierte en diseños aptos tanto para SMR como GGRR, debido a esa amplio rango de potencias. Este tipo de reactores es interesante en países donde quieren hacer el mejor uso de una limitada disponibilidad de combustible nuclear (16).



### 2.4.1.2 Reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR)

Los reactores rápidos refrigerados por plomo o plomo/bismuto eutéctico (LBE) pueden ser más seguros comparados con los SFR gracias a la alta temperatura de ebullición de los metales pesados. El bismuto y el plomo no reaccionan con el agua o el aire, lo que implica en diseños mucho más simples y seguros, lo que hace que el coste de inversión sea menor. El mayor inconveniente de estos reactores es la corrosión y erosión de refrigerante, por lo que la selección de materiales sigue siendo un reto. Rusia tiene algo de experiencia con reactores LBE en submarinos y ha completado el diseño del BREST-300, un LFR de unos 300 MWe el cual se espera que empiece su construcción en 2025.

### 2.4.1.3 Reactores rápidos refrigerados por gas (GFR)

Un GFR es un reactor rápido de alta temperatura refrigerado por helio. Este tipo de reactores pretenden combinar los aspectos positivos de los VHTR (alta temperatura) y FR (uso moderado de uranio y minimización de residuos). El avance en esta tecnología es aún muy poco maduro, todos los grandes retos que supone su utilización deben ser resueltos, especialmente en el aspecto de seguridad, evacuación del calor residual, materiales que soporten tales temperaturas o el combustible necesario. Además, como no está basado en tecnologías ya probadas, será necesario la construcción de un prototipo que demuestre su utilidad y todavía muchos aspectos del reactor se podría decir que no han abandonado el plano teórico y la apuesta y el nivel de investigación en torno a estos reactores es bastante bajo. Si llega a desarrollarse es de esperar que sea de los últimos en torno a los FR.

## 2.4.2 Reactores de alta temperatura (VHTR)

Los VHTR se basan en una experiencia de operación de unos 50 años, alguno de los cuales son con plantas reales. Su principal objetivo era la cogeneración de electricidad y la aportación de energía para procesos que necesitasen una alta temperatura. Primero se intentó desarrollar para temperaturas de salida del núcleo de en torno a 1000 °C, sin embargo, el objetivo actual se sitúa en máximo 850 °C, hasta ese punto se podrían utilizar materiales existentes y no sería necesario abrir una vía de investigación para el desarrollo de nuevos materiales resistentes a altas temperaturas.

La mejora en la seguridad ha sido demostrada ya que muchos de los posibles accidentes en un GGRR han sido descartados, ya que, por ejemplo, aún bajo condiciones extremas el núcleo no puede fundirse o emitir productos de fisión al exterior. Por lo tanto, una de las ventajas que claman los desarrolladores es que no es necesaria una zona de evacuación, pero mayor es el reto de convencer a las autoridades que licitan las instalaciones que muchos de los sistemas de seguridad activos que se llevan instalando años ya no son necesarios en este tipo de plantas. Lo que queda todavía por demostrar es si esta instalaciones son rentables económicamente, que lo que realmente ensalza o hunde a un proyecto de este tipo.

En China encontramos la planta HTR-PM (high temperature gas cooled reactor pebble bed module), el primero de los dos reactores que componen la planta se conectó a la red en diciembre de 2021, después de que ambos reactores se encendiesen durante ese año (17). Aunque, eso sí, pretender alcanzar una temperatura de 1000°C conllevaría hacer más investigaciones y pruebas sobre el combustible y los posibles materiales. Con el funcionamiento de este reactor se estudiará la viabilidad de integrar varios reactores, dos concretamente, que alimentan una única turbina, como vemos en la Figura 6, lo cual podrá ser utilizado en futuras plantas nucleares.

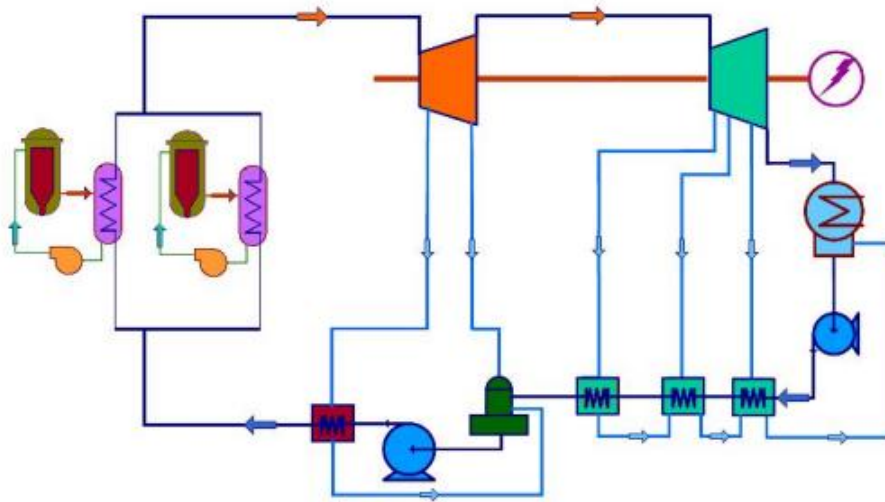


Figura 6 Diagrama simplificado de la instalación del HTR-PM (16)

### 2.4.3 Reactores supercríticos refrigerados por agua (SCWR)

Los SCWR están basados en los reactores refrigerados por agua que tenemos en la actualidad, con la salvedad de que se pretende que trabajen a mayores temperaturas y presiones. La ventaja principal es que la eficiencia aumentaría considerablemente frente a los BWR o PWR. Algunos países como China, Canadá o Japón tienen en marcha desarrollo de conceptos en torno a estos reactores, pero debemos destacar que ningún reactor de demostración o experimental ha sido construido, por lo que al menos serán necesarios unos 20 años para que la primera planta de este tipo entre en funcionamiento.

### 2.4.4 Reactores de sales fundidas (MSR)

Los MSR se distinguen por su combustible principalmente ya que se encuentra disuelto en sales fundidas, en algunos diseños no es así y las sales fundidas se utilizan como caloportadores y/o refrigerante primario como es el caso del Ultra Safe Energy MMR, desarrollado en dicho apartado. Estos reactores son atractivos debido a su eficiencia, ya que trabajan a mayores temperaturas que un PWR o BWR y a su seguridad debido a que trabajan a presiones relativamente bajas, además podrán ser recargados de combustible en funcionamiento si se quisiera tal característica y además los residuos serán menores.

Esta tecnología fue parcialmente desarrollada y demostrada en un reactor experimental en EE. UU. entre 1965 y 1969. Aunque todavía queda por demostrar la viabilidad de estos reactores sobre todo a largo plazo y como responden los materiales y su corrosión con las sales.

## 2.5 Economía de los SMR

A lo largo de la historia de las plantas nucleares, los desarrolladores han intentado aumentar los reactores, es decir, hacerlos más grandes, de tal forma que se beneficiasen de la economía de escala. Esto quiere decir que aumentar el tamaño implica un menor coste en la producción de electricidad, un LCOE menor (14). El LCOE (en inglés Levelized Cost of Energy), se suele expresar en [\$/kWh] y su valor representa el coste total de producir un kWh de potencia teniendo en cuenta la recuperación de la inversión inicial. Este dato lo podemos calcular con la expresión que aparece en la Ecuación 1, que puede simplificarse estableciendo que el numerador incluye todos los costes generados durante su vida (proyección, diseño, operación, desmantelamiento, etc.) y en el denominador nos encontramos toda la energía eléctrica que produce.

$$LCOE = \frac{(Capital\ inicial + Costes\ de\ financiación) + Costes\ de\ operación\ (incluye\ compra\ de\ combustible,\ almacenaje\ y\ tratamiento) + Coste\ de\ desmantelamiento + Valor\ residual}{(Potencia\ [MWe] * 1000 * Factor\ de\ capacidad\ [%] * 8760 \left[ \frac{h}{año} \right])}$$

Ecuación 1 Cálculo del LCOE

Si nos fijamos en la Ecuación 1 veremos claramente que si nos encontramos ante una obra de larga duración los costes de financiación aumentarán y, por lo tanto, aumentaría el LCOE. Dicho coste también dependerá del origen de la inversión y su tasa de descuento (ligada a los coste de financiación), ya que normalmente si la inversión es pública la tasa será más baja, en torno al 3%, frente a la tasa de descuento originada por una inversión de origen privado que se puede encontrar entre el 7-15 %. Este es un número algo controversial ya que si asumimos una tasa de descuento menor favoreceremos a las instalaciones nucleares y renovables, ya que tienen un mayor coste inicial, pero sin embargo sus costes operacionales son menores. Por otro lado, el LCOE también aumentaría si por ejemplo nos encontramos en una instalación con un factor de capacidad bajo, ya sea porque necesita un mantenimiento frecuente o las paradas para la recarga son habituales y de larga duración. Ambas situaciones serían solventadas por un SMR, ya que su periodo de construcción se espera que sea menor, además de que sus periodos entre recargas serán mayores, llegando en algunos modelos a ser innecesarias. Otro factor para tener en cuenta es el burn-up del combustible, es decir, un mayor burn-up implicará un menor uso de combustible a largo plazo por lo que implicará en menores coste de almacenaje y tratamiento tras su uso, aunque se espera que este factor afecte de manera reducida.

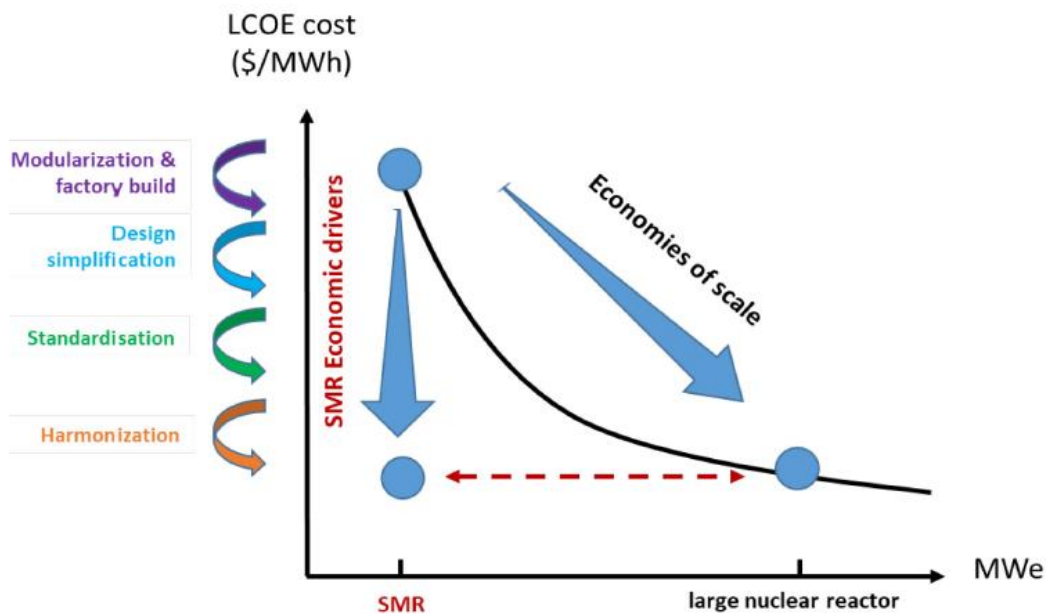
En los costes que pueden verse eliminados por la utilización de un SMR nos encontramos la instalación de la red eléctrica que transporta la energía producida hasta el consumidor, ya que una de las alternativas planteadas es la posibilidad de la instalación de un SMR en centrales térmicas ya existentes, consecuentemente ese gasto sería prácticamente nulo frente a la necesidad de realizar una instalación completa desde cero.

Tanto en el ámbito privado como público, las instituciones podrían obtener financiación más fácilmente para un SMR modular que aumente su capacidad o potencia a lo largo de los años que para un reactor de gran potencia. Los SMR serán interesantes en aquellos casos donde la fuente de financiación sea limitada, ya que la inversión será menor para el primer módulo instalado, pero si realizamos un complejo multimodular, podremos en el transcurso de los años ir añadiendo más reactores en función de la demanda, los cuales lo podemos financiar con los que ya están operativos, consiguiendo autofinanciarnos una gran parte.

Respecto a las diferencia de financiación de los SMR con los GRR encontramos dos diferencia principales; la primera es la duración del tiempo de construcción de las centrales. Los SMR se esperan que tengan tiempo

más reducidos, lo que reducirá en gran medida los costes financieros derivados de un préstamo a largo plazo con la ventaja, claro está, de que conseguiremos beneficios generados de la explotación del reactor antes. Un ejemplo de cómo puede llegar a afectar esto el siguiente: una empresa pide un préstamo de 5 mil millones de euros a un 5% de interés durante 30 años, durante los primeros cinco años no obtendrá beneficios por lo que no podrá hacer ningún pago relacionado con el préstamo, con lo que el coste total teniendo en cuenta los gastos relacionados con los intereses será de 9,6 mil millones de euros. Si por cualquier motivo la construcción se viese parada o retrasada durante un año esto se vería reflejado en un sobrecoste de 500 millones de euros, una cantidad nada despreciable. Por lo que los SMR y sus planes de construcción más estandarizados y cortos reducirá potencialmente todos esos posibles sobrecostes que pueden llegar a paralizar un proyecto así. La segunda diferencia principal es que muchos de los diseños de los SMR, como se ha expuesto, son multimodulares, esto permitirá instalar módulos mientras que otros ya están en funcionamiento y que los beneficios generados por los que están en funcionamiento financien los nuevos, reduciendo en gran medida el préstamos inicial y los costes financieros derivados de ellos.

Como hemos explicado previamente los reactores nucleares de gran tamaño se tienden a realizar de aún más potencia y así beneficiarse de la economía de escala, los SMR no pueden beneficiarse de ello por lo que en un principio se tendería a pensar que su LCOE es elevado y así podría ser, sin embargo, se apoya en la economía de producción en serie para hacer que la potencia producida tenga un coste similar o menor que en los GGRR. La producción en serie tiene 4 pilares que la hacen una gran aliada: la simplificación de diseños, la estandarización, la modularización además de maximizar la fabricación in-situ y reducir las operaciones en el lugar de explotación. Podemos observar esta tendencia en la Gráfica 6 (13).



Gráfica 6 Tendencia del LCOE en SMR con producción en serie

La utilidad y beneficios de la fabricación en serie ya ha quedado demostrada a lo largo de la historia, en industrias y productos muy diversos. Con los primeros SMR fabricados en serie podría llegar a amortizarse todo el capital invertido en investigación desarrollo o coste de certificación. Pero comenzar la fabricación en serie de un dispositivo como un reactor nuclear no es algo trivial ni fácil, deben existir una serie de condiciones. El mercado para un diseño en concreto debe ser suficientemente grande, se debe conseguir que un diseño o pocos de los que se están desarrollando se superpongan al resto y aún en todas las ventajas que suponen los SMR, el sistema no funcionará con muchos modelos disponibles en el mercado. El otro problema

es la legalización y regularización de los reactores, ya que cada país puede tener sus normativas y sería imposible adaptar los modelos según el país de destino, por lo que habría que buscar una normativa armonizada en los potenciales países clientes (13).

Ahora se verá en más profundidad en que consiste los 4 pilares que sustentarán la fabricación en serie de los SMR. Respecto a la simplificación de los diseños, nos encontramos que al tener núcleos más pequeños los sistemas de seguridad pasivos tienen una efectividad mayor, lo que lleva a unos diseños más simples. Incluso algunos sistemas activos como las bombas de refrigerante y sus sistemas auxiliares no serán necesarios en muchos diseños de SMR, lo que supone una gran ventaja frente a GRR, un ejemplo de esto sería el reactor de NuScale que funciona con circulación natural. El calor que se crea en los núcleos de GRR se evacúa con sistema activo de refrigeración, los cuales evidentemente consumen potencia. No solo estos sistemas sino otros y su redundancia hace que los costes y la complejidad de GRR sea mayor que un SMR, que reducirá la complejidad y posiblemente los sobrecostes. Otra de las simplificaciones en torno al diseño de los SMR son los edificios que formen el complejo nuclear, ya que se podrá pasar de usar arquitectura específica de las plantas nucleares a arquitectura civil, mucho más estandarizada y sobre todo más barata. Es un intento de ir más allá y conseguir reducir aún más los costes de inversión, algunos diseños de SMR plantean la colocación en el mismo edificio las siguientes partes: sala de control, turbinas o reactor, ahorrando así espacio y dinero. Todas estas series de simplificaciones en el diseño podrían convertirse en un menor coste de inversión, tanto por la reducción de componentes y sistemas como por la reducción de personal cualificado necesario.

Respecto a la estandarización, otro aspecto clave en la producción en serie, ha demostrado ya reducir significativamente costes en los GRR y así se espera que ocurra con los SMR. Esto no influirá solo en la propia construcción sino también en el transporte hasta la planta, ya que, con la existencia de unos modelos estandarizados, un transporte común para todos podría ser posible, por lo que no existirá la necesidad de crear vehículos o medios especializados para cada reactor. Esto no implica que todos los modelos deban ser exactamente iguales, lo que sí se pretende es que compartan unas dimensiones semejantes y una producción de vapor (si hubiere) parecida, además de los sistemas de seguridad ligados a cada reactor, todo ello también con la vista puesta en simplificar normativa y permisos (13).

Otro de los aspectos clave es la modularización y la construcción en fábrica. La modularización es una forma de simplificar la construcción de la planta, construyéndola en bloques para después ser ensamblados en la propia fábrica o en el lugar de explotación. Cabe destacar que no es algo nuevo, ya para GRR se ha usado la construcción por módulos, sin embargo, se espera que los SMR se beneficien aún más de este sistema. Estas reducciones se esperan que sean relacionadas del hecho de construir los módulos en la propia fábrica donde los controles de calidad y procesos de ensamblajes estén estandarizados y sea seguido por un personal de alta cualificación, en un entorno donde todo está dirigido a la perfecta construcción del reactor y no en una zona de obras donde se realizan muchas más labores. Eso sí, el grado de modularidad no será igual para todos los modelos, dependerá del diseño que se aplique a cada uno, los que aún se encuentran en etapas iniciales de diseño tienen más probabilidades de tener un carácter más modular. El transporte también es un aspecto clave, el tamaño determinará la posibilidad de ser transportado y la facilidad con la que se podrá hacer, aunque en algunas industrias con alto grado de modularización el transporte sigue siendo un problema. En muchos de los diseños de los SMR el sistema de suministro de vapor al completo se podría transportar usando medios convencionales como camiones, barcos o trenes (13).

En el ámbito de la industria energética la construcción por módulos ha demostrado ahorrar hasta un 40 % en concepto de tiempos y hasta un 20 % de ahorro económico (13). En el caso concreto de los reactores nucleares hoy en día la modularización y la construcción en fábrica suponen hasta un 30 % del proceso y podría llegar hasta el 60-80 % con estrategias más ambiciosas y la reducción de componentes. La fabricación en las propias industrias también puede conllevar una serie de ventajas, como la posibilidad de aplicar técnicas de construcción o ensamblado de última tecnología lo cual sería inviable si se realizase directamente en el lugar

de destino, como la soldadura con láser, lo que reduciría costes y tiempos de entrega, además numerosas inspecciones futuras.

Uno de los beneficios clave será la esperada reducción en tiempos de construcción y que estos sean al final del proyecto los establecidos, evitando posibles retrasos y paradas que tienden a ocurrir con los GGRR. Con ello además reducir el tipo de interés al que se ve sometido el préstamo inicial del proyecto, al tener un menor riesgo y tiempo de construcción.

Aunque no todo es positivo, la construcción de esta forma, en tan alto porcentaje es algo novedoso y por lo tanto no resulta una tarea sencilla. Se necesitará una gran investigación y trabajo de ingeniería para seleccionar y diseñar adecuadamente los módulos, de tal forma que se reduzcan al mínimo las posibilidades de fallos o accidentes durante el ensamblaje.

En resumen, se espera que los SMR tengan una serie de beneficios económicos frente a un GR, como son; un coste más reducido, lo cual implicará una mayor facilidad por parte de los inversores para aportar dinero, ya que supondrá un menor riesgo y en un proyecto así la financiación con una buenas condiciones es algo fundamental. Además, este menor riesgo podrá atraer nuevas fuentes de financiación tanto de ámbito privado como público, atraído por ese menor coste de capital y un previsible LCOE menor que en los GGRR. Otro punto a favor es el menor tiempo de retorno de la inversión y posiblemente un menor tipo de interés impuesto por los inversores, debido a los menores tiempos de construcción y a la posibilidad, como se ha comentado previamente, de auto financiar en parte la expansión de la planta. Ya que existen diseños que serán multi modulares, por lo que mientras un módulo ya instalado, produciendo potencia y beneficio, se usaría dicho dinero bien para la devolución de la inversión inicial o para seguir completando la planta nuclear con más reactores sin la necesidad de una inversión tan fuerte como la inicial. Esto también supone una gran ventaja ya que no es necesario hacer una inversión completa al principio para una planta con, por ejemplo, seis reactores, se puede comenzar con uno e ir escalando en potencia según los beneficios y la demanda de potencia. Esto supone una gran diferencia y una virtud muy atractiva frente a los GGRR.

Por otro lado, otro de los atractivos será la ya mencionada construcción en serie de modelos estandarizados de SMR, que significará no solo un beneficio reflejado en el LCOE sino en los tiempos de entrega y construcción. Quizás esta sea la ventaja más difícil de alcanzar ya que el mercado debe alcanzar un alto grado de madurez y debe existir una demanda creciente para los diseños que se sobrepongan, porque se debe recordar que este sistema comercial no puede funcionar con muchos modelos y diseños distintos disponibles. Estos tiempo más reducidos supondrán un gran atractivo sobre todo para esas economías que sufran una gran auge de demanda eléctrica en un corto tiempo, donde los SMR podrán encontrar uno de sus nichos.

También debemos tener en cuenta las inversiones ya hechas por numerosas empresas en los actuales GGRR y en sus mejoras, los cuales ya se encuentran en operación y comercialización. Todo ese dinero no solo incluye el diseño, sino también el entrenamiento de personal cualificado, pruebas y costes derivados de las licencias y permisos. Es evidente y a no ser que se tome alguna decisión estratégica (algo poco probable) que ese dinero debe ser recuperado antes de hacer nuevas inversiones en tecnologías como la de los SMR o incluso en reactores de Generación IV. Es importante destacar que los actuales reactores, incluyendo los más novedosos en comercialización fueron financiados en un principio por instituciones públicas y los han promovido en los últimos 60 años. Por lo tanto, para nuevos proyectos o diseños que se encuentren en mercados desregulados que no tengan la participación de entidades públicas, la probabilidad de que alcancen el mercado son muy limitadas. Es importante remarcar que los proyectos que en los últimos veinte años han alcanzado el mercado han sido financiados casi con exclusividad por parte de los gobiernos de cada nación (14).

## 2.5.1 Mercado de los SMR

Hoy en día el mercado en el que se espera que tenga un hueco los SMR es algo incierto, debido a las etapas iniciales en muchos proyectos y la dificultad de aunar una legislación común entre distintos países. Aun así, se han hecho una serie de previsiones de los nichos donde probablemente tengan un papel relevante. Los SMR se han diseñado para expandir la utilidad de la energía nuclear más allá de suponer la carga base del suministro eléctrico de un país. Estas utilidades las podrías aunar en; la descarbonización de la producción de energía, cómo complemento a las energías renovables, en aplicaciones distintas a la producción eléctrica y finalmente para facilitar el acceso a la energía nuclear en nuevos sectores o zonas.

### 2.5.1.1 Descarbonización

Las constantes políticas de los países en busca de reducir o eliminar la producción de CO<sub>2</sub> puede beneficiar al futuro de los SMR, ligado indivisiblemente a la existencia de inversores o no, como ya se ha dejado claro previamente. Estos reactores pueden considerarse una alternativa que se ajuste a la sustitución de centrales de carbón, por ejemplo. Así, en EE. UU. hay construidos unos 60 GWe de centrales térmicas de carbón que tienen una potencia de entre 50 y 300 MWe, lo cual es una potencia muy similar a la de los SMR y como ya se ha planteado los SMR podrían ser instalados en centrales térmica ya existente, como las de carbón y ahorrar aún más en costes.

Los SMR también podrían descarbonizar otros sectores, como la calefacción urbana, la cual requiere temperaturas entre 80 y 200 °C. Países como Reino Unido o Finlandia ya se han planteado su utilidad. Incluso en un futuro, cuando la Generación IV sea una realidad otros tipos de procesos se podrán descarbonizar debido a mayores temperaturas de salida del núcleo de entre 450 y 800 °C (13).

### 2.5.1.2 Integración con fuentes de energía renovables

Está claro que en los últimos años la preocupación por las emisiones de gases invernadero y en especial de CO<sub>2</sub> ha ido en aumento. Esto, unido a la volatilidad de los precios de la electricidad de los últimos años y sobre todo en 2022 con una gran inestabilidad mundial y una constante alza de los precios de las materias primas, además de la variabilidad de las energías renovables hacen parecer a los SMR una buena alternativa para los mixes eléctricos. Esta combinación aún lo mejor de cada mundo tanto las ventajas de las renovables como la estabilidad y seguridad de producción que ofrece un reactor nuclear. La unión de estas dos fuentes de energía podría ser una solución para el reto energético. Debemos destacar que un sistema híbrido como el que se plantea es un sistema donde disponemos de varias fuentes de energía, en este caso nuclear y renovables, y varios productos derivados de esta producción, que pueden ser electricidad, calor o productos químicos entre otros. Las actuales redes utilizan varias fuentes de energía para suplir la demanda tanto de electricidad como de calor, sin embargo, estas fuentes independientes se acoplan malamente en la mayoría de las redes actuales, cada una de las fuentes se conecta individualmente a la red y ya en la red se maneja todos los aportes energéticos como un único total. Un verdadero sistema híbrido tiene de forma óptima acopladas las fuentes de energía entre sí, requiere además un subsistema para responder apropiadamente a la demanda de la red y sus variaciones. El sistema híbrido es una nueva visión de un sistema energético que conlleva el mejor aprovechamiento de las fuentes de energía y por lo tanto lo hace parecer una alternativa para tener en cuenta. En la Figura 7 podemos observar lo que sería el esquema de un sistema híbrido, donde unimos la producción con renovables y un SMR, el cual además también suministra calor a una fábrica de gasificación. Las gráficas azules dentro de la propia figura representan la demanda o producción de energía durante un día corriente (13).

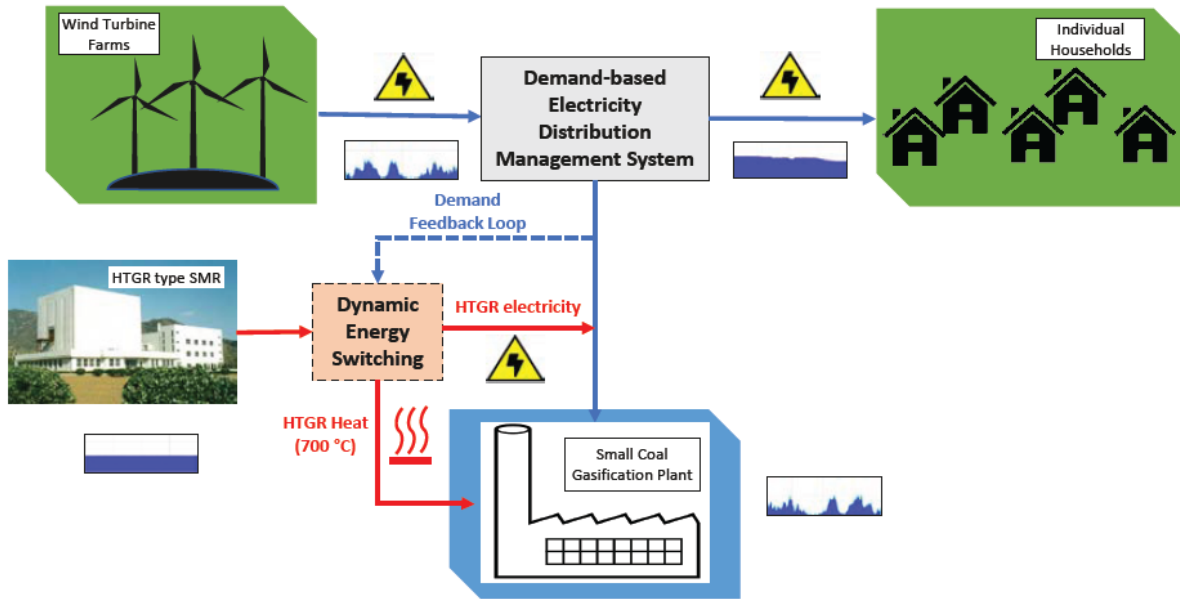


Figura 7 Sistema híbrido formado por renovables junto a un SMR (14)

Esta combinación y la flexibilidad que ofrecen los SMR puede sobreponerse a otras opciones de producción de energía limpia en el mercado, con flexibilidad nos referimos a la variedad de usos que se le pueda dar tanto para producción eléctrica como para otros fines, además de que la potencia puede ser aumentada a lo largo de los años si la demanda fuese creciendo. Todo ello teniendo en cuenta que los precios de la electricidad no se verían afectados por cambios en los precios a corto o medio plazo, en el precio del combustible o materias primas. Hasta cierto punto la energía nuclear es insensible a este tipo de eventualidades, con las ventajas para la economía de la población que esto supone. Los SMR también podrían tener un papel de carácter estabilizador en aquellas redes con un gran número de fuentes renovables y eliminar o reducir las fuentes suplementarias de energía basadas en combustibles fósiles. Se podrán combinar con todo tipo de fuentes; viento, solar, mareomotriz, hidroeléctrica o geotérmica para producir tanto electricidad como otros productos.

Puede tener un papel importante en países del medio oriente donde el clima es muy seco o instalarse en unidades flotantes para suplir la demanda en países nórdicos, algo que ya ha puesto en práctica Rusia.

### 2.5.1.3 Facilitar el acceso de energía a nuevos sectores o zonas

Hoy en día a lo largo de todo el mundo un gran número de reactores suponen la carga base del suministro eléctrico de muchos países, sin embargo, el uso de este tipo de energía no ha llegado a muchos países donde la economía, su geografía o desarrollo impiden la implantación de un reactor nuclear.



Los SMR están diseñados para poder ser instalados en zonas remotas que no están conectadas a la red o su acceso a energía es complicado, o en lugares donde la instalación de un GGRR es complicada o tienen una red eléctrica pequeña. Un ejemplo de ello podrían ser las comunidades mineras que se encuentran aisladas y basan su energía en generadores diésel, los SMR podrían ser una alternativa más fiable y limpia de estos motores. Aunque quizás donde tenga un mercado más pujante sea en aquellos países donde no usan aún la energía nuclear en ninguna de sus formas. Los SMR pueden significar la entrada en la producción eléctrica nuclear de muchas naciones que buscan una “rápida rentabilidad”, tiempos cortos de construcción y fiabilidad.

## 2.6 Características del ciclo de combustible

Se estima que la demanda anual de uranio de aquí a 2040, será entre 56.640 y 100.225 toneladas de uranio natural (6), todo ello en función de las centrales que se acaben construyendo y si las actuales extienden su vida útil. Si tomamos la previsión a la baja, el consumo será aproximadamente el mismo a años anteriores, sin embargo, si tomamos la previsión máxima hará falta incrementar las actividades de exploración y creación de nuevas minas de uranio.

Desde 2019 la producción de las minas mundiales ha provisto del 87% de la demanda mundial. El restante uranio ha sido suplido por fuentes secundarias de suministro, las cuales llevan agotándose desde 2010, además se espera que muchas de las minas acaben su vida útil a mediados de la década de 2030. Si tenemos en cuenta que el tiempo promedio necesario para comenzar la extracción de uranio de una mina son de 15 a 20 años, existe cierta preocupación en el sector por la seguridad en el suministro a medio y largo plazo de uranio. Recientemente, la pandemia de COVID-19 no ha ayudado a esta situación y podría imponer una carga adicional. En 2020 varios productores de uranio suspendieron las operaciones o las redujeron. Así, el suministro primario de uranio se redujo al 78%, unas 46.500 toneladas, lo cual incrementa la presión en las fuentes secundarias.

En el sector hay una constante mejora de los procedimientos de enriquecimiento, se desarrollan nuevas tecnologías con el fin de mejorar aún más la seguridad, la competitividad y la economía de las centrales nucleares actuales y futuras. Como se usan nuevos materiales tanto para el combustible como para la vaina, a veces se podrá requerir un enriquecimiento mayor de 5% para compensar la pérdida de transparencia neutrónica del material de envainado. Para aumentar las ganancias, también se está trabajando en la mejora del quemado del combustible (burn-up), se pretende alargarlo y aumentar así la duración del combustible. Aun así, el combustible usado resultante será distinto (con mayores grados de quemado), lo cual tendrá un impacto en aspectos finales del ciclo, como el transporte o la disposición final. Para ello se necesitará inversiones importantes para las nuevas instalaciones y las licencias pertinentes (6).

En el diseño de los SMR no solo hay que tener en cuenta el dispositivo en sí, debemos tener en cuenta muchos otros procesos e instalaciones paralelas que serán necesarios para su correcto funcionamiento. Uno de ellos es el combustible, su fabricación y tratamiento.

La gran variedad de diseños implica una gran variedad de combustibles y disposiciones, muchos de ellos nunca utilizados u otros ya conocidos como el  $UO_2$ . Una de las ventajas de utilizar el óxido de uranio es que ya se dispone de una gran industria que lo respalda además de muchos años de experiencia en el sector. El uso de este combustible en los SMR estará relegado a los reactores LWR.

Los SMR-PWR se pretende que sigan un ciclo de combustible como los grandes reactores construidos hasta ahora. Con ello se refiere a que usarán una geometría y distribución similar, además de no superar un 5% de enriquecimiento. Esto también hace parecer que los residuos generados podrán reprocesarse para ser reutilizados. Como hemos comentado en el capítulo anterior, los SMR tienen un rendimiento térmico menor que los reactores convencionales de gran potencia, esto tiene implicaciones directas en el uso del combustible,

ya que el uranio por kWh será mayor, lo cual aumentará el coste del combustible. Se pretende que el tiempo de recarga en los pequeños reactores sea mayor que los tiempos que se manejan hoy en día.

Si hablamos de los reactores basados en tecnologías de la generación IV, encontramos ciertas diferencias. Aunque la mayoría de estos reactores se están diseñando para que su combustible este basado en el uranio, se deberán crear toda una nueva industria alrededor de este aspecto.

Un punto clave de estos reactores es que se pretende que ofrezcan un ciclo del combustible de una duración mayor, incluso llegando a los 20 años.

Algunos de estos diseños están planteando el uso de un combustible basado en el uranio, pero con un enriquecimiento de entre el 5 y 19,75%, el cual se ha denominado “high-assay low-enriched uranium” (HALEU). La cuestión es que las aplicaciones de este combustible están limitadas a su escasa producción, donde las pequeñas partidas que se fabrican se destinan a investigación o para la producción de isótopos con fines médicos.

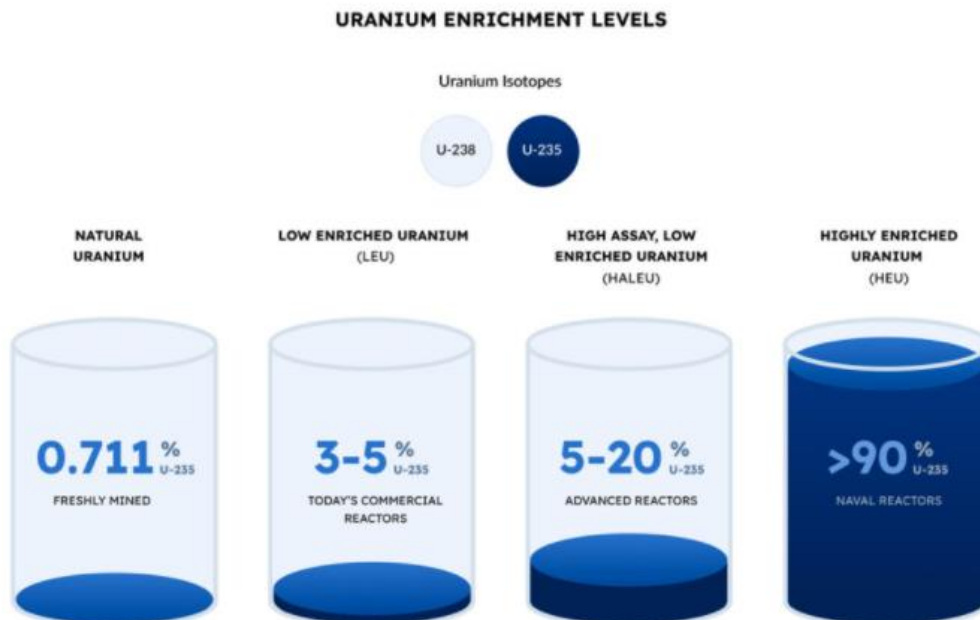


Figura 8 Enriquecimiento del U-235 según la finalidad

Actualmente este combustible no se produce a escala comercial, debido primero a la falta de demanda actualmente (aunque se prevé un aumento de esta en los próximos años) y segundo por la falta de infraestructuras.

El uso de HALEU tiene muchas ventajas en la operación del reactor. La mayor concentración de U-235 significa que el núcleo puede ser menor y no necesitará ser recargado a menudo, motivos por los que se ve como una gran solución para los SMR y MMR. Incluso en el futuro podría usarse para reactores existentes en la actualidad.

Cerrar el ciclo del combustible nuclear es un factor clave para garantizar la viabilidad de un proyecto. Los materiales fisionables pueden recuperarse del combustible gastado. El reprocesamiento de combustibles como el óxido de uranio o el reciclaje de uranio y plutonio son procedimientos que se llevan a cabo hoy en día en los LWR, sin embargo, pocos de estos reactores tienen la licencia para utilizar dichos combustibles. Estos combustibles reciclados y su uso permitirán un uso más eficaz de los recursos naturales y reducirá la carga de los desechos generados. Para ello una vez más hará falta una gran inversión para apoyar estas aplicaciones (6).

Como ya hemos comentado la variedad de combustibles es amplia, donde muchos usarán configuraciones ya vistas con leves modificaciones de combustibles hoy en día comercializados y otros utilizarán configuraciones en desarrollo y que aún no se han añadido al mercado, podemos ver un resumen de los principales reactores y sus combustibles en la Tabla 2.

Design	Fuel type/assembly array	Fuel enrichment (%)	Thermal efficiency (%)	Core discharge burnup (GWd/ton)	Refuelling cycle (months)
<b>LWR land-based SMR</b>					
NuScale	Uranium oxide (UO <sub>2</sub> ) pellet/17x17 array	<5%	30%	> 30	24
SMART	UO <sub>2</sub> pellet/17x17 array		30%	< 54	30
SMR-160	UO <sub>2</sub> pellet/square array		30%	45	24
Nuward	UO <sub>2</sub> /17x17 array		31%	-	24
BWRX-300	UO <sub>2</sub> /10x10 array		32%	49.5	12-24
UK SMR	UO <sub>2</sub> /17x17 array		35%	55-60	18-24
<b>Mobile SMRs</b>					
KLT-40S	UO <sub>2</sub> pellet in silumin matrix	18.6%	23%	45.4	30-36
RITM-200	UO <sub>2</sub> pellet/ hexagonal array	<20%	29%	-	72-84
<b>Gen IV and MMRs</b>					
Aurora	Recycled HALEU fuel (EBR-II used fuel)	-	38%	-	240
eVinci	HALEU fuel	5 - 19.75%	29%	-	> 36
Natrium	HALEU fuel	-	-	-	-
ARC-100	U-Zr alloy	13.1%	35%	77	20
Energy Multiplier Module (EM <sup>2</sup> )	Uranium carbide/hexagonal array	~14.5%	53%	130	360
Westinghouse Lead Fast Reactor	Uranium oxide, before transitioning to uranium nitrides	≤ 19.7%	47%	≥ 100	≥ 24
Integral Molten Salt Reactor (IMSR)	Circulating molten salt fuel (fluoride) with U	<5%	44%		84
Stable Salt Reactor	Static molten salt fuel (chloride) with Pu	Reactor grade Pu	40%	120 - 200	Online refuelling
KP-FHR	TRISO fuel	19.75%	44%		
U-Battery	TRISO fuel	<20%	40%	80	

Tabla 2 Resumen del tipo de combustible usado por cada reactor (13)



## 3 MICRO MODULAR REACTOR

---

Los MMR han sido en los últimos 6 años objeto de interés y estudio por parte de las empresas tanto entidades públicas como privadas. Estos reactores buscan aumentar aún más las ventajas que ofrecen los SMR, “sacrificando” la potencia. Estos reactores producen como máximo 10 MWe, son de tamaño aún más reducido que los SMR y su instalación se espera que sea aún más rápida, llegando incluso a ser menos de 30 días.

Estos reactores se encuentran en desarrollo en Canadá, China, EE. UU., la Federación Rusa y en algunos países miembros de la Unión Europea. Como hemos comentado estos reactores tienen algunas características únicas. Su capacidad para ser fabricados en serie es mayor que en los SMR, pueden ser transportados más fácilmente y ser conectados más brevemente a la red, tanto para producir electricidad como calor. Estos reactores no están limitados por un moderador específico, refrigerante o rango de energía neutrónica, ya que tienen un rango muy amplio de funcionamiento. Por ejemplo, algunos de los refrigerantes pueden ser helio, plomo, aire, agua o metal líquido. Otra de las claves en el diseño de estos dispositivos es que se pretende que muchos de ellos solo sean necesario una carga de combustible durante toda su vida útil.

Como es lógico estas instalaciones deberán tener su respectiva seguridad y su desarrollo debe entorpecer una posible proliferación con fines no-pacíficos.

Se espera que los MMR tengan su nicho tanto en el mercado eléctrico como de calefacción para zonas aisladas, como el Ártico o poblados en islas. Además de en operaciones mineras, pesca, como fuente de energía alternativa para bancos de datos, para plataformas o propulsión marinas. Todos estos mercados están topados por el motor diésel como fuente de energía y será el mercado donde se espera que compitan los MMR.

Muchas empresas del sector ven los MMR como el atajo para el éxito comercial de los SMR, sobre todo teniendo en cuenta la falta de alternativas al motor diésel para instalaciones aisladas, la subida constante del precio del combustible y de la gran fuente de contaminación que suponen. Esto se ve reforzado con el hecho de que en Canadá 5 de los 12 dispositivos en proceso de obtener la licencia son MMR.

Uno de estos proyectos está desarrollado por “Global First Power”, el cual usa la tecnología desarrollada por “Ultra Safe Nuclear Corporation”, para producir un MMR de en torno a 15 MWt, con una vida útil esperada de 20 años. El proceso para conseguir las licencias y permisos comenzó en 2019.

### 3.1 Ultra Safe Energy MMR

El MMR es un reactor de alta temperatura refrigerado por gas (GFR) de cuarta generación que como objetivos principales tiene producir energía de forma segura, limpia y rentable. Es el proyecto más prometedor en Canadá y el primero que usó el concepto de pila nuclear. Generará en torno a 5 MWe de un total de 15 MWt.

#### Hitos en el desarrollo (18)

- 2016 – 2021 Desarrollo del proyecto
- 2021 – 2027 Construcción y acondicionamiento del terreno
- 2023 – 2054 Operación de la planta
- 2044 – 2058 Desmantelamiento
- 2058 – 2060 Abandono definitivo

#### 3.1.1 Diseño de la planta

El proyecto está diseñado para albergar dos edificios principales; el edificio con el reactor y el edificio adyacente. El edificio con el reactor podrá albergar entre uno y dos reactores que proveerá de calor a la planta adyacente el cual contiene el sistema de sales fundidas. El edificio adyacente consiste en el equipamiento y sistemas que convierten la energía térmica en electricidad u otras formas de energías según la necesidad inicial del cliente. Se pretende que ambos edificios no ocupen más de 20.000 metros cuadrados. La distribución de la planta la podemos observar en la Figura 9.

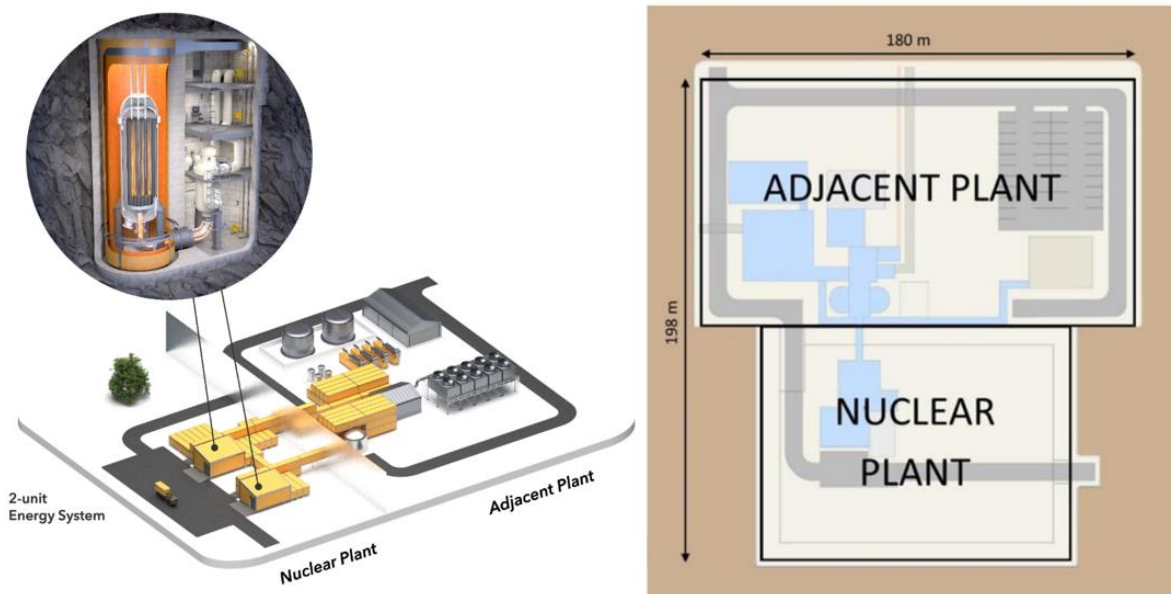


Figura 9 Distribución de la planta MMR

### 3.1.2 Diseño del reactor

El reactor estará enterrado bajo tierra, donde el núcleo consistirá en bloques hexagonales de grafito que contendrán los pellets de combustible. El núcleo tiene una baja densidad de potencia ( $1,23 \text{ W/cm}^3$ ) y una gran capacidad para absorber altas temperaturas, lo que conlleva en cambios lentos y predecibles de la temperatura.

El refrigerante del circuito primario del reactor será helio, el cual pasará a través del núcleo y transportará su energía hasta el sistema de sales fundidas. El helio es un refrigerante muy conveniente debido a los siguientes motivos: es un gas inerte, transparente a la radiación y sus productos, en este entorno lo encontraremos siempre en fase gas, por lo tanto, no puede llegar a hervir. Además, no reacciona con los componentes o el combustible del reactor. Es fácil de medir y controlar su presión dentro de la vasija, donde también el propio combustible usado asegura que el helio esté libre de productos de fisión. Todo ello brinda una ventaja extra y es que este reactor no necesita agua para su funcionamiento, por lo que supone una gran ventaja para zonas con escasez de recursos o incluso en lugares donde no hay agua (usos espaciales).

El combustible que usará el reactor esta denominado como “FCM Fuel” (Fully Ceramic Micro-Encapsulated Fuel) (19). Basado en la tecnología TRISO, que tiene como principal objetivo retener los productos de la fisión, con un enriquecimiento del 19,75 % (HALEU), el núcleo contendrá 180 barras de combustible, que supondrá un total de 172.800 pellets. El combustible TRISO envuelve al uranio en una serie de capas cerámicas, además en la versión que manejará este reactor tendrá una capa de un carburo de silicio, con una estructura como la del diamante, podemos observar las distintas capas en la Figura 10. Las capas que forman el elemento desde el interior serían las que siguen: el propio combustible en el núcleo de la esfera, otra capa de carbón poroso de  $40 \mu\text{m}$ , la siguiente capa es de un carbón pirolítico de un grosor de  $35 \mu\text{m}$ , después encontramos una capa de carburo de silicio de  $40 \mu\text{m}$  y por último una capa de recubrimiento a base de carbono de  $100 \mu\text{m}$ . Todo ello lo convierte en un combustible muy estable y resistente a altas temperaturas.

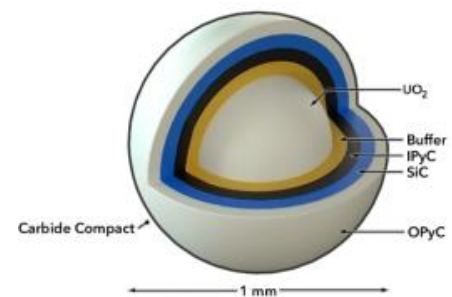


Figura 10 Estructura FCM Fuel (20)

Todos estos pequeños elementos combustibles son empaquetados en los pellets, que albergará cada uno aproximadamente 7644 elementos, formando cilindros de 2,3 cm de diámetro y 2,52 cm de altura, para posteriormente formar las barras de combustible que llenaran el núcleo, este proceso lo podemos ver en la Figura 11.

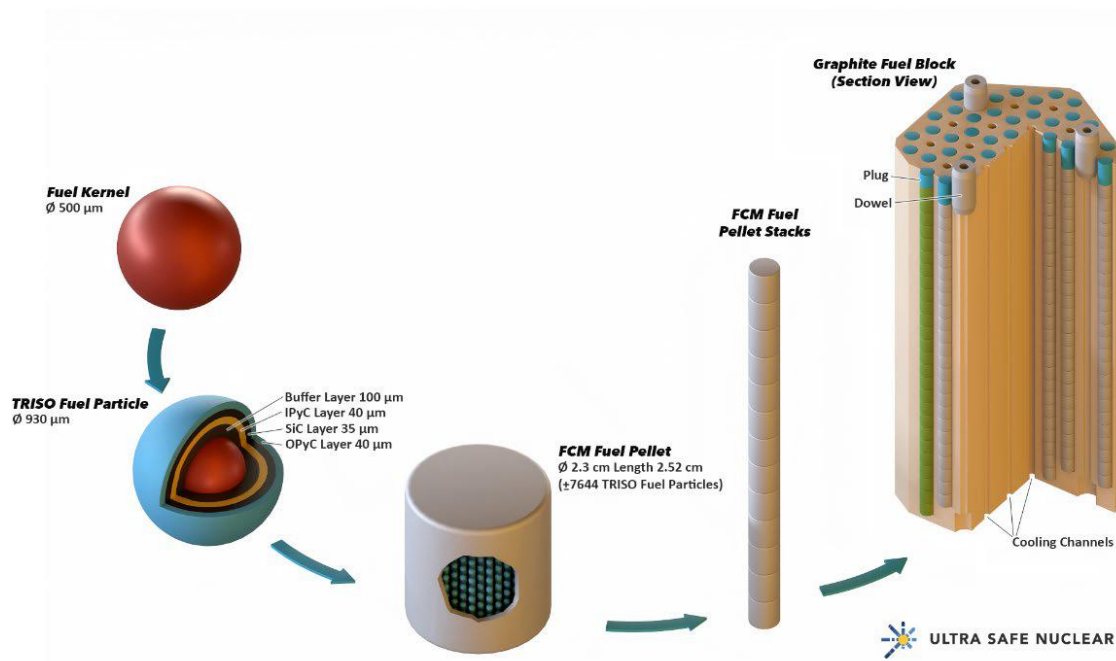
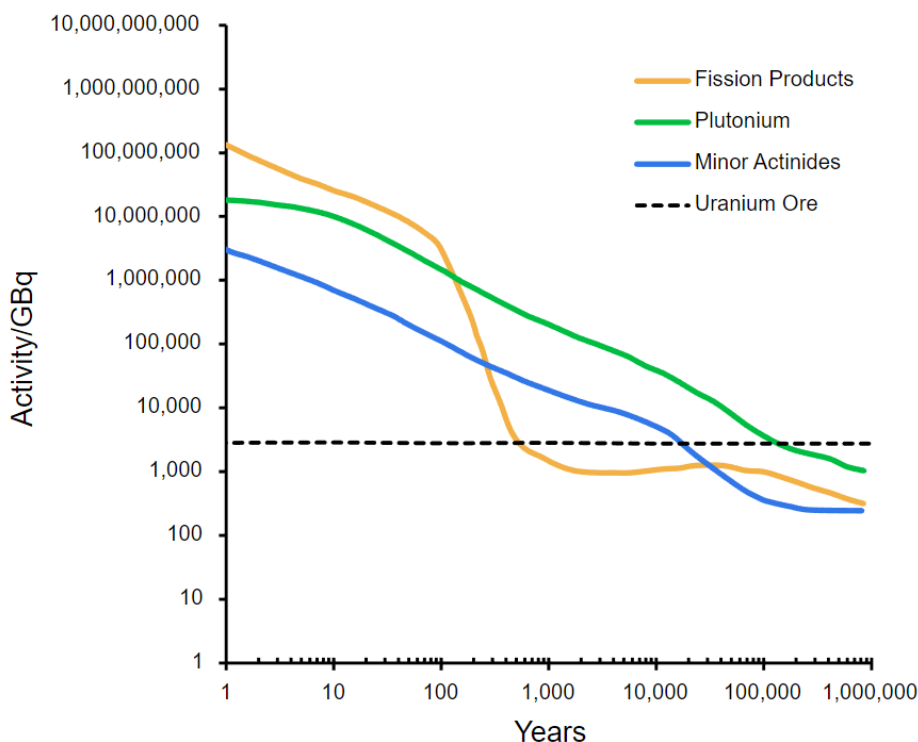


Figura 11 Proceso de ensamblaje de las barras de combustible (20)

La vida del complejo será de 20 años, en los cuales no necesitará en ningún momento que el núcleo se recargue con combustible fresco. Llegado el momento y si se viese posible, se podría reemplazar el núcleo del reactor por uno nuevo y así funcionar otros 20 años. Pero en principio no será necesario hacer ningún tipo de manejo de combustible en la propia instalación, lo que es una gran ventaja. (20). Como resultado de su explotación el dispositivo producirá a lo largo de toda su vida útil unas 2,2 toneladas de combustible gastado. Este podrá ser utilizado para extraer aún más energía o simplemente depositado en instalaciones seguras como un AGP (almacén geológico profundo), el cual es la alternativa que la comunidad científica considera más segura para el almacenaje de residuos de alta actividad y se estima que se situarán a una profundidad entre 500 y 1000 metros, esto dependerá del tipo de terreno (21). El decaimiento hasta niveles naturales de los productos de fisión es un proceso largo, como vemos en la Gráfica 7, mientras tanto el propio combustible contendrá todos los productos radiactivos que puedan liberarse al ambiente.





Gráfica 7 Decaimiento de los productos hasta los niveles naturales

La vasija a presión del reactor contiene el núcleo. El reactor tiene un drenaje en la base e impide la entrada de agua si se diese el caso, ya que no hay generador de vapor en el circuito primario. Respecto al refrigerante, helio, circula hacia arriba para evitar el sobrecalentamiento debido a la salida de gases del núcleo. El reactor está diseñado para que en el circuito primario siempre haya helio caliente rodeado de helio frío a una mayor presión, de tal manera que si hay cualquier fuga será de frío a caliente, por lo tanto, elimina la posibilidad que una posible corriente de gas caliente afecte a la barrera de presión. Las temperaturas a las que llega el refrigerante están entre 630°C cuando abandona el núcleo y 300°C al penetrar en él. El diseño del MMR evita problemas también con el intercambiado de calor, ya que no utiliza tubos y en vez de eso se sirve de una tecnología basada en intercambiadores de placas. En la Figura 12 podemos observar las distintas partes de reactor, donde debemos destacar esa doble capa de helio frío y caliente, la cual se ve claramente ya que únicamente disponemos de un conducto de entrada y salida del reactor, el cual es una tubería de doble flujo.

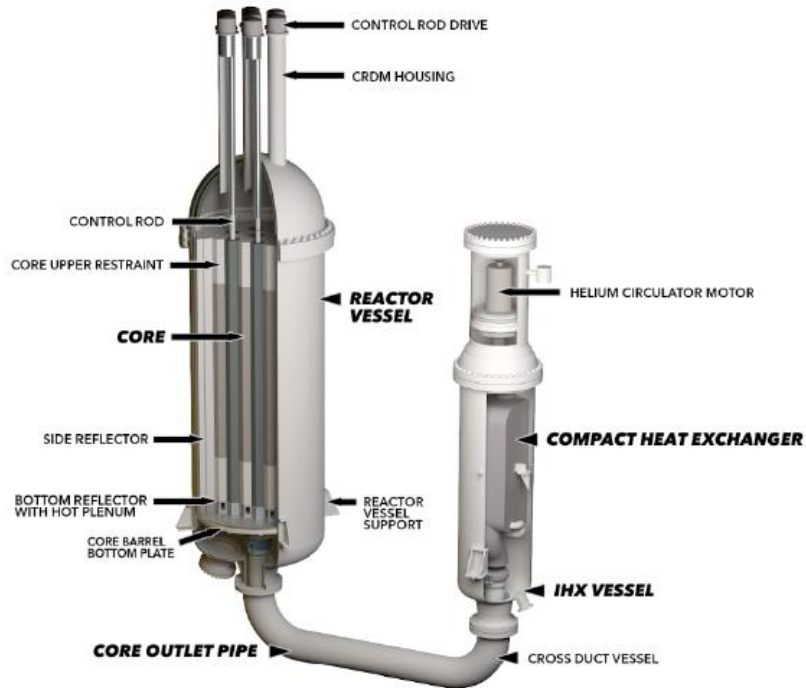


Figura 12 Estructura del reactor MMR – USNC (20)

Como comentamos previamente la instalación consta de dos partes; el edificio que contiene el reactor y el adyacente, en este último es donde se produce la conversión de energía térmica en eléctrica, claro está si es la función de esa planta en concreto. Dicho edificio contiene el sistema de sales fundidas que funciona como intermediario entre el calor generado en el reactor y el producto final ya sea electricidad o calor. El sistema consiste en una serie de bombas que mueve la sal caliente y fría, con temperaturas de 565 y 275 °C respectivamente, a través de una serie de tanques, como podemos observar en la Figura 13. Los tanques sirven como almacén de energía y para regular las corrientes de sales. Una de las ventajas de usar este sistema es que permite que el complejo trabaje como una batería nuclear flexible que se adapte a la demanda, aunque la potencia cedida por la pila sea más o menos constante.

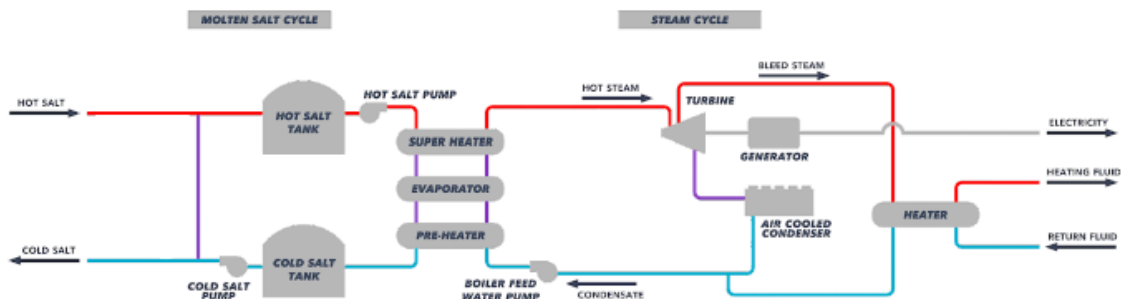


Figura 13 Sistema de producción eléctrica con sales fundidas (20)

### 3.1.3 Seguridad

El MMR ha sido diseñado por USNC donde gran parte de la tecnología está basada en sistemas ya probados con sus propias características de seguridad. Respecto al control de la reactividad, el núcleo dispone de dos sistemas independientes de apagado. El sistema de control del reactor consiste en las barras de control suspendidas en el reactor, que entran o salen del reactor para controlar la reacción, las cuales son liberadas automáticamente en caso de emergencia por mera gravedad. El reactor mantendrá una temperatura estable de manera indefinida, incluso si el sistema de refrigeración falla, debido a las características de los combustibles y el diseño del reactor, donde en caso de emergencia el reactor se enfría a través de medios pasivos, no serán necesarios sistemas eléctricos o agua para enfriar el reactor durante un hipotético fallo.

Una de las características a destacar es que el combustible retiene todos los productos generados de la fisión, además de que la vasija nunca será abierta y por lo tanto nunca habrá combustible usado expuesto en la instalación, esto evita que se deban implementar en el diseño muchos de los sistemas de seguridad que se instalan en los GRR, los cuales son costosos y requieren un personal especializado. El margen de seguridad del combustible es tan amplio que no es necesario más barreras.

Uno de los objetivos principales para mejorar la seguridad es limitar la potencia por unidad de volumen y aumentar la superficie, de tal forma que si fuese necesario el propio dispositivo sería capaz de disipar el calor generado, como hemos expuesto previamente. En concreto, el MMR tiene la mayor relación área/potencia de todos los reactores comercializados, como podemos observar en la Figura 14, usando además uno de los combustibles con mayor rendimiento disponibles.

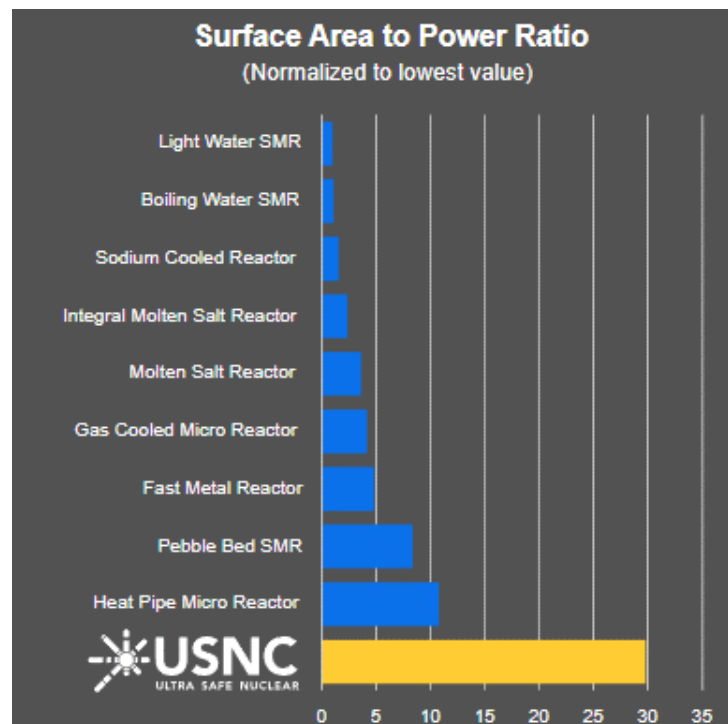


Figura 14 Relación área/potencia MMR

En el caso de un accidente o algún tipo de daño (intencionado o no) causado al reactor, el refrigerante del circuito primario (helio), abandonará la vasija con muy poca energía térmica, además de una cantidad mínima de residuos de la reacción de fisión, ya que estos serán contenidos por el propio combustible, esto se denomina micro-contención. Evidentemente, la instalación se diseñará para que no se pueda acceder al reactor sin equipamiento especializado.



# 4 ALGUNOS PROYECTOS DE SMR

---

Como se ha comentado a lo largo de todo el documento existe una gran variedad de proyectos en desarrollo a lo largo de todo el mundo, con una gran variedad de diseños y enfoques. En este apartado desarrollaremos dos reactores en desarrollo, uno basado en los GRR-PWR y otro perteneciente a la llamada generación IV, un reactor de sales fundidas (MSR). Por orden son; el NuScale (EE. UU.) y el IMSR-400 (Canadá).

## 4.1 NuScale Power Inc.

La empresa estadounidense NuScale Power desarrolla un modelo propio de un pequeño reactor modular de agua ligera (LWR), para proporcionar tanto electricidad como calor, en distintos procesos. Será un dispositivo totalmente fabricado en un lugar distinto a su destino final, está previsto que proporcione una potencia de 60 MWe. Todo ello en una versión más reducida y más seguro de un reactor de agua presurizada de gran tamaño. La planta diseñada podría albergar hasta 12 reactores idénticos, llegando a producir 720 MWe. El tamaño reducido de este reactor ofrece las ventajas tanto de reducir la huella de carbono, así como un menor riesgo financiero y menores tiempos de construcción.

### Hitos en el Desarrollo

El proyecto comenzó en 2003 y se espera que en 2027 comience a funcionar el primer reactor comercial, durante estos años la evolución ha sido como sigue:

- **2003** – Comienza el diseño preliminar
- **2007** – Se crea la empresa NuScale Power Inc. Con el fin de comercializar el diseño
- **2011** – La Fluor Corporation se convierte en el principal inversor de la empresa
- **2013** – NuScale gana el primer gran concurso público para invertir en el proyecto
- **2017** – Se envía el diseño para certificar a la U.S. NRC (DCA)
- **2018** – Termina la primera fase del DCA
- **2019** – Termina la segunda fase del DCA
- **2020** – Termina el proceso de comprobación
- **2022** – La NRC certifica el diseño
- **2023** – Se espera que comience la fabricación de la primera planta en EE. UU.
- **2027** – Puesta en marcha de la primera planta de NuScale

### 4.1.1 Diseño de la planta

La planta se distribuye como se muestra en la Figura 15. Todos los sistemas de seguridad se situarán en el edificio del reactor. A ambos lados del edificio de contención nos encontramos dos edificios que albergarán las turbinas, seis en cada uno, es decir, una turbina por reactor. Lo que implica un diseño más sencillo del motor ya que no tendría que responder a las variaciones de carga, simplemente se acciona una turbina por reactor. La planta también incluiría todos los edificios auxiliares necesarios como; oficinas, almacenes o el depósito de combustible gastado, haciendo que la extensión de la planta no supere los 140.000 m<sup>2</sup>.

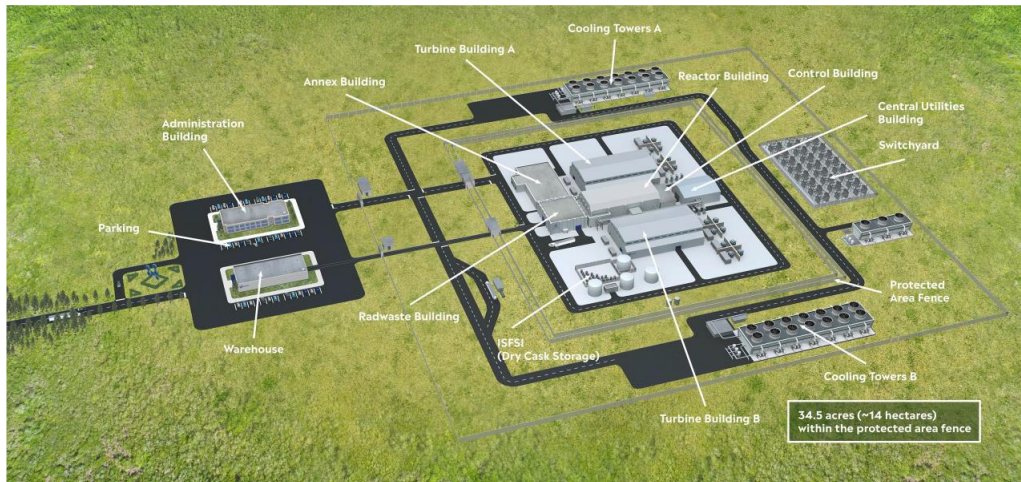


Figura 15 Diseño de la planta de 12 módulos de NuScale (23)

#### Edificio del Reactor

Este edificio contendrá el propio reactor y todos los sistemas y componentes necesarios para el correcto funcionamiento y apagado de la planta. Será un edificio rectangular de 107 metros de largo y 46 metros de ancho y 25 metros de alto. El edificio es de categoría I, lo que quiere decir que está diseñado para soportar los mayores seísmos que pueden darse en la zona de construcción (22). Además de construirse con hormigón reforzado, para resistir impactos de aviones, las inclemencias meteorológicas y todo lo que puede suponer una amenaza para su integridad estructural.

#### Edificio de Control

Este edificio alberga la sala de control principal, donde se sitúan todos los paneles de control de la planta, el centro de soporte y otras instalaciones relacionadas con la operación y el mantenimiento.

#### Edificio de Residuos

Contiene el equipamiento y sistemas para procesar los desechos radiactivos y prepararlos para su traslado, ya sean en estado gaseoso, líquido o sólido. También incluye equipamiento para compactar residuos de baja actividad y así reducir su volumen y poder almacenarlos de forma temporal.

## Edificio de Turbinas

Como hemos indicado previamente tenemos dos edificios de turbinas independientes, cada uno con seis turbinas y sus respectivos sistemas auxiliares que incluyen el sistema de condensación y sus condensadores y el sistema de alimentación de agua. En la Figura 16 podemos observar más en detalle su distribución.

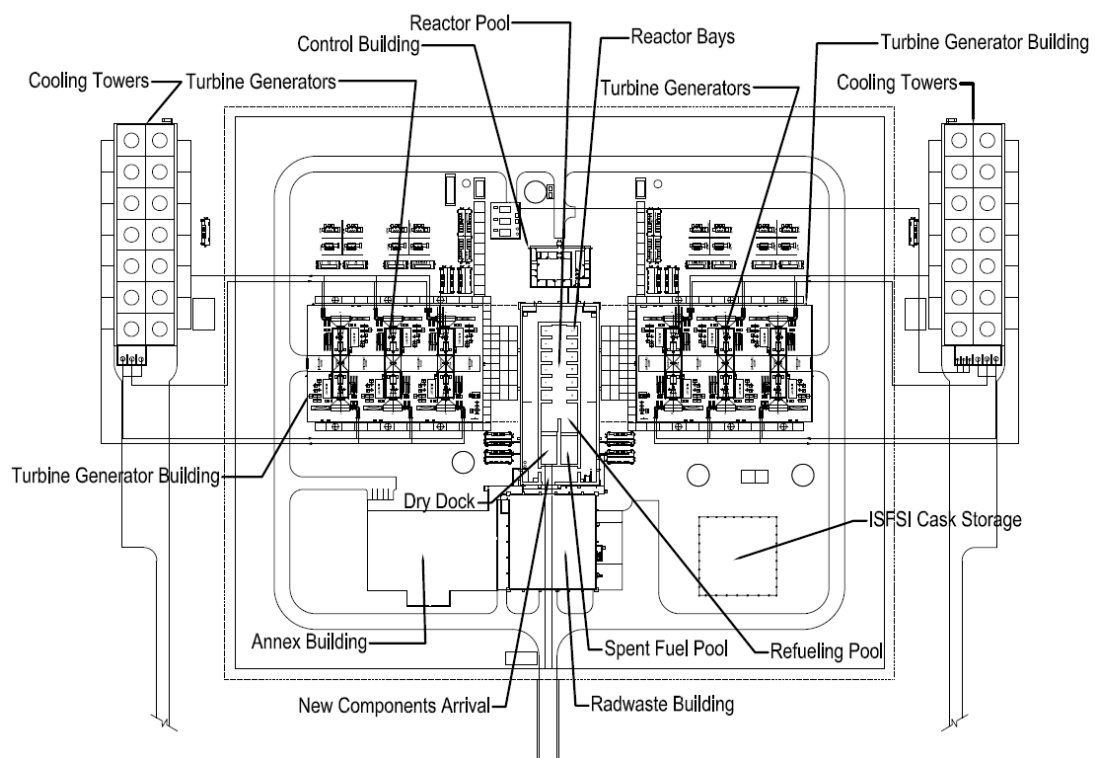


Figura 16 Layout planta NuScale (Edificio reactor y turbinas) (23)

## Edificios auxiliares

Estos edificios cumplen diversas funciones como; controlar el acceso a las zonas tanto radiológicas como no radiológicas del edificio del reactor. Alberga varios servicios de soporte al personal, duchas, taquillas, baños, comedor o sala de conferencias. Además, incluye sistemas de seguridad individual para el personal, zona de descontaminación de equipos o seguimiento de dosímetros.

## Edificio de seguridad

Es el acceso principal al complejo, sirve para monitorizar y controlar el tránsito de personas y vehículos, así como controlar el acceso a cada zona de la planta.

### 4.1.2 Diseño del reactor

El diseño integral incluye el propio núcleo del reactor, dos generadores de vapor helicoidales y un presionador, todo ello dentro de la vasija a presión del reactor que a su vez está contenido en la vasija de contención. La vasija del reactor tiene una dimensiones de 17,8 metros de largo y 3 metros de ancho, la vasija de contención tiene unas dimensiones de 23 metros de alto y 4,6 metros de ancho. Podemos ver la distribución de los distintos sistemas en la Figura 17.

El núcleo consta de un conjunto de 37 barras de combustible de la mitad de tamaño que las de un GR, con 16 barras de control seguidas del “riser” que es rodeado por los dos generadores de vapor helicoidales.

El agua de alimentación es bombeada dentro de los generadores de vapor donde se evapora y genera vapor sobrecalentado, dentro de este proceso encontramos el presionador, el cuál mantiene la presión para que se produzca dicho vapor durante todo el proceso. La presión del refrigerante del reactor se aumenta con un sistema de calentadores situados en la parte superior de la vasija y se reduce gracias a un sistema de spray, que forma parte del sistema CVCS (en inglés, *Chemical and Volume Control System*), el cual tiene otras funcionalidades de las cuales hablaremos más adelante. El presionador también se encuentra en el propio módulo como vemos en la Figura 17 y ocupa un espacio de 16,4 m<sup>3</sup>, pudiendo albergar como máximo 9,8 m<sup>3</sup> de líquido. La parte superior de la vasija de contención sirve además de para soportar las barras de control, para albergar el sistema de spray del presionador. También existe una barrera entre el agua saturada del presionador y del refrigerante circulante del reactor, la cual es una placa de acero sobre el generador de vapor, el cual tiene una serie de orificios para limitar la circulación de agua además de servir como una barrera térmica (24). Los módulos son puestos en funcionamiento por debajo del nivel del suelo, en una piscina de 28.000 m<sup>3</sup> de hormigón recubierto de acero inoxidable.

Este sistema llamado “Ultimate Heat Sink (UHS)”, consiste en una piscina realizada en hormigón reforzado y recubierta de acero inoxidable, que incluye las piscinas de los reactores, combustible sin usar y combustible usado. Su objetivo principal es poder absorber todo el calor generado por los 12 reactores durante al menos 30 días. Además, sirve para reducir y retener todas las posibles emisiones de productos generados durante la fisión, en un posible fallo de la planta. Provee un escudo hacia el exterior de la posible radiación contaminante y una barrera física extra de seguridad.

Otro de los sistemas principales del conjunto es el control de químicos (CVCS), este sistema recircula parte del refrigerante del reactor a través de una serie de filtros para mantener la composición necesaria dentro del núcleo.

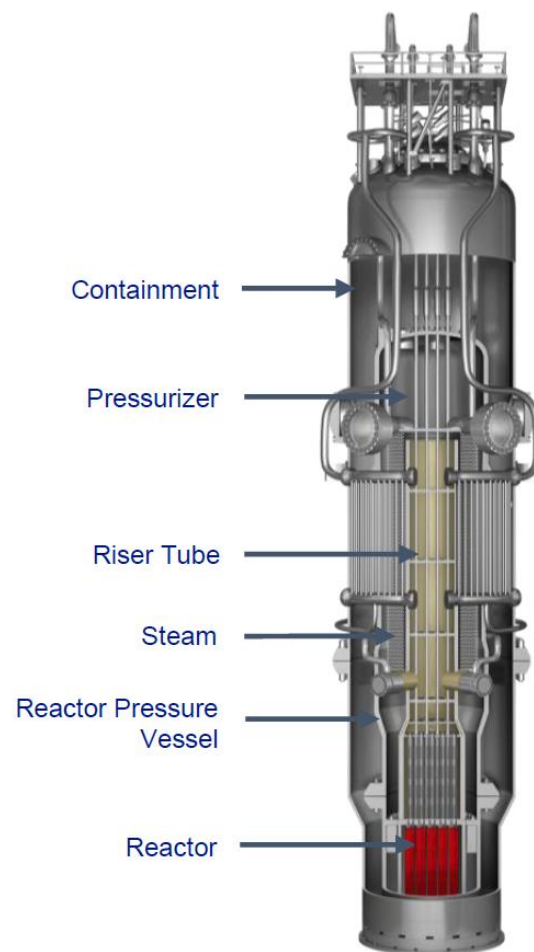


Figura 17 Reactor NuScale (23)



El reactor está diseñado para poder funcionar con circulación natural, es decir, por mera diferencia de densidades, lo que en un evento donde hay un apagón eléctrico y no se ha perdido refrigerante el calor podrá seguir siendo evacuado sin necesidad de corriente eléctrica.

¿Qué diferencia a este diseño de reactor frente a sus posibles competidores?

Podríamos resumir en cuatro las características que definen a este reactor, que lo hacen novedoso y que lo diferencia de sus competidores.

- Diseño compacto: cada reactor puede ser completamente prefabricado en fábricas y ser transportado por tren, camiones o barcos hacia su lugar de explotación junto a otros módulos en funcionamiento. La fabricación de los módulos en un entorno controlado tiene una serie de ventajas como reducir costes, mejorar la calidad y reducir tiempos de construcción.
- Circulación natural: el núcleo se enfría completamente mediante circulación natural, donde el refrigerante absorbe y elimina el calor del sistema de la vasija de contención. El refrigerante primario se calienta en el núcleo para crear un líquido de baja densidad que fluye hacia arriba por el tubo ascendente. Las bobinas del generador de vapor en espiral envueltas alrededor del exterior del tubo ascendente transfieren el calor del refrigerante primario al fluido secundario, lo que aumenta su densidad. La diferencia de densidad entre el núcleo y el generador de vapor da como resultado la fuerza de flotación que mueve el líquido alrededor del circuito. Trabajar con circulación natural tiene importantes ventajas ya que elimina bombas, tuberías y válvulas y con ellas el mantenimiento y posibles averías asociadas a estos componentes. También se reduce la demanda de mano de obra además de eléctrica de la planta. Todo este proceso lo podemos ver en la Figura 18 , en la que vemos claro como circula el fluido por el núcleo y reactor.

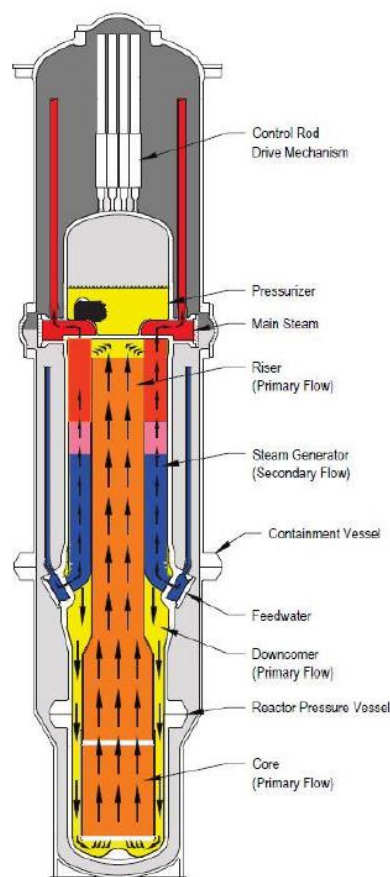


Figura 18 Circulación por convección natural en NuScale (23)

- Tecnología ya existente: el diseño se basan en los ya conocidos WRC, por lo que este reactor puede ser licitado bajo la normativa que abarca a los LWR, lo cual agiliza y facilita enormemente las labores legales. No solo a nivel legal, sino a nivel tecnológico estamos usando sistemas ya conocidos y probados por lo que el desarrollo será también más rápido y atraerá a más inversores.
- Pruebas con prototipo: entre los muchas pruebas y ensayos llevados a cabo se debe destacar un prototipo de 1/3 del tamaño original del reactor, que es calentado eléctricamente y que trabaja a las presiones y temperaturas reales de funcionamiento del reactor. Esto ha contribuido a demostrar la seguridad durante la operación y aumentar la confianza de los inversores en el proyecto.

### 4.1.3 Núcleo y combustible

El núcleo de cada reactor consiste en las 37 barras de combustible y en las 16 barras de control y 21 tubos guía que tienen una función estructural, el central es destinado a herramientas intranucleares, todo ello separado por rejillas intermedias como vemos en la Figura 19. El combustible usado es  $UO_2$  enriquecido al 4,95%. Este es una versión modificada de “Framatome HTP22”, el cual es usado en reactores PWR, donde la única diferencia es el tamaño, tiene la mitad de longitud, resultando en unas dimensiones de 17x17, como vemos en la Figura 20, lo que hace un total de 264 barras de combustible. Este reactor tiene un 5% menos de combustible del que utilizaría un reactor convencional de potencia semejante.

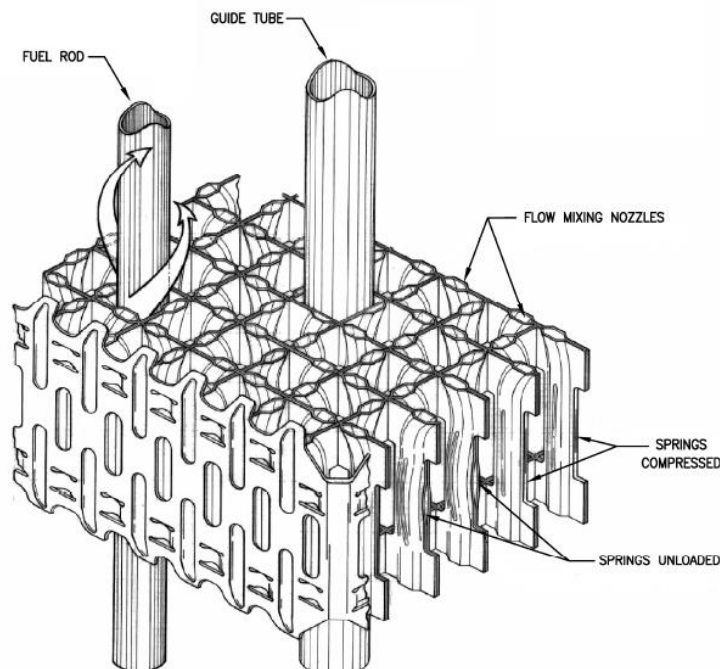


Figura 19 Rejillas espaciadoras del núcleo (25)

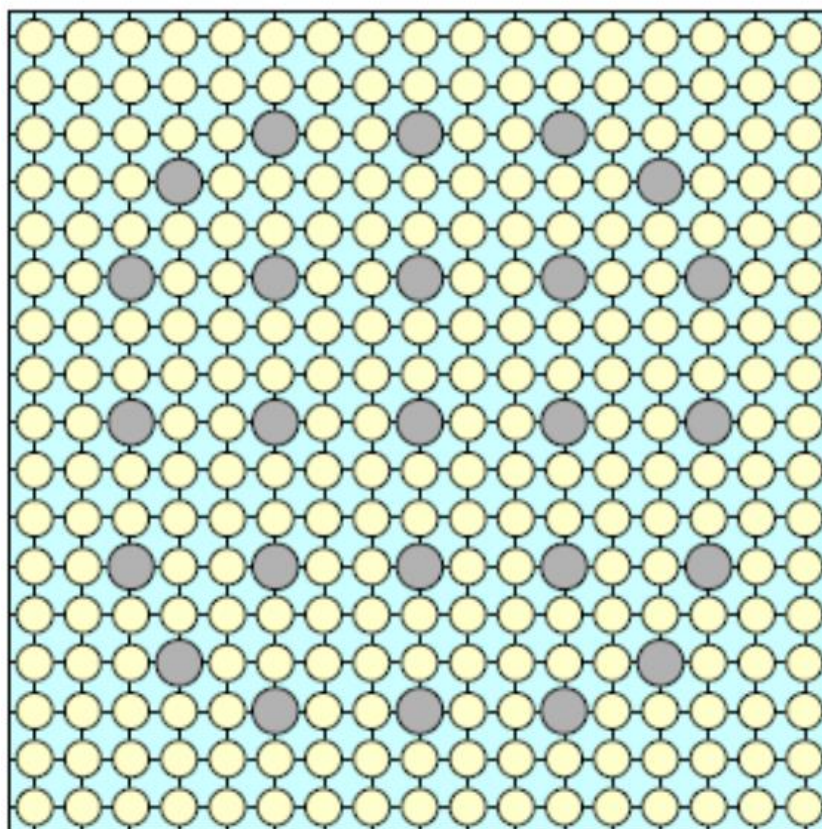


Figura 20 Distribución 17x17 del núcleo, las barras de control se identifican con el gris

Esta versión del combustible se ha denominado “NuFuel-TTP2”, el revestimiento del combustible es denominado “M5” y es fabricado por la misma empresa. Es una aleación de Zirconio y Niobio, que mejora la corrosión y asegura una menor vida del hidrógeno dentro del núcleo (26). Usar un combustible ampliamente usado e investigado tiene unas evidentes ventajas, como la experiencia en su uso y su fiabilidad, además de una industria alrededor y un sistema de distribución ya creado, lo que logísticamente facilita el diseño y licitación de la planta.

Los módulos se recargarán en un ciclo escalonado de 24 meses, equivalente a un ciclo de 12 GWd/MTU (burn-up), movidos por una grúa hacia una zona de recarga común adyacente al tanque de combustible gastado. En la Figura 21 se muestra como es la planta de 12 módulos y el recorrido que debe hacer el combustible al ser cargado y descargado. Cada módulo se encuentra debajo de un escudo de tres lados hacia la piscina general. El propio edificio también incluye los sistemas para instalar y desinstalar los módulos que es el mismo usado que para las recargas.

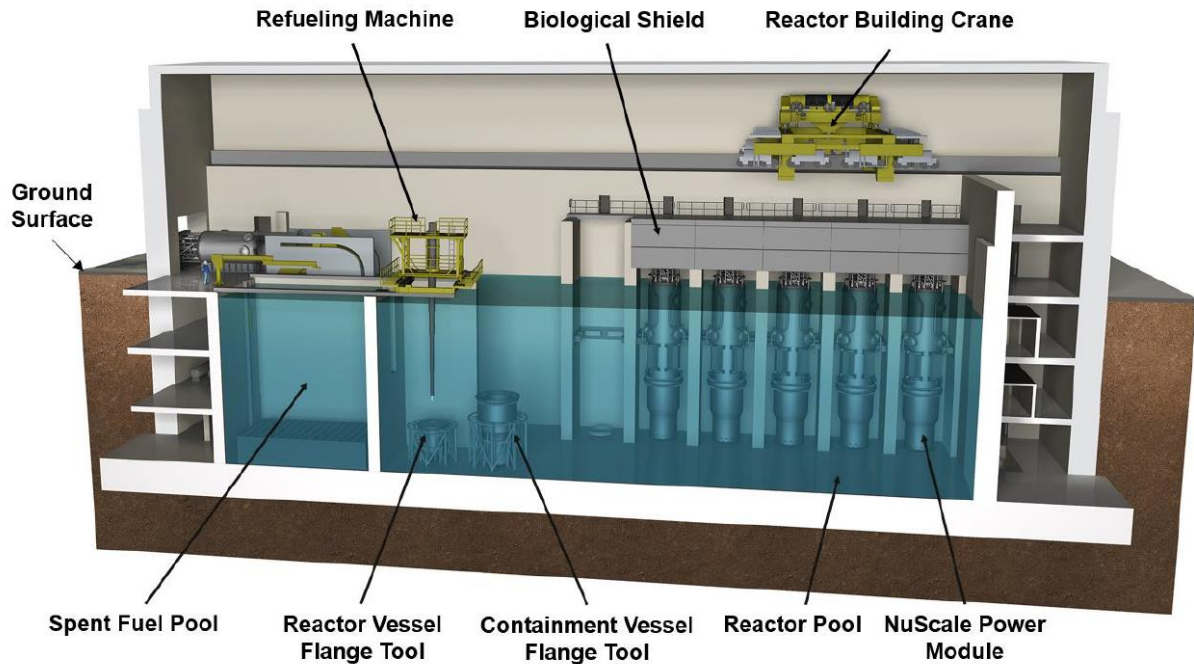


Figura 21 Vista transversal del edificio de contención de NuScale (23)

El diseño del edificio del reactor permite completar la carga de un solo módulo mientras los otros módulos continúan produciendo electricidad. Esta sustitución escalonada de módulos individuales puede ser realizada por un pequeño equipo permanente de personal en lugar de emplear un gran número de empleados de manera temporal según hagan falta o no. Dependerá del propietario o del operador, si las operaciones de reabastecimiento de combustible se pueden realizar durante todo el año o en grupos durante los períodos de baja demanda.

La recarga de un único módulo se espera que pueda ser realizada en 10 días. Después del enfriamiento, el módulo se desconecta del sistema de abastecimiento de fluidos y entonces se mueve con el sistema que en la Figura 21 se denomina como “Reactor Building Crane”, hacia la zona de recarga. Mientras se recarga el núcleo, la parte superior del módulo se moverá a un depósito parcialmente seco para su inspección y mantenimiento. La recarga del núcleo se hace transportando los elementos de combustible verticales entre la sección inferior de la vasija del reactor y el tanque de combustible gastado adyacente a través de una zona ubicada en la pared que separa el tanque de combustible gastado del tanque del reactor. Durante el proceso de recarga de combustible, un tercio de los elementos combustibles se eliminan del núcleo. Los elementos restantes se colocan en otra ubicación central mediante un modelo de colocación "out-in". Los conjuntos retirados se almacenan en el tanque de combustible gastado para su enfriamiento inicial, luego se trasladan a un almacenamiento en seco en el sitio o almacenamiento temporal de combustible, según corresponda. Después de recargar el núcleo, el módulo se vuelve a montar, se lleva al lugar de uso y se vuelve a conectar a todas las líneas de suministro.

Este reactor utiliza dos sistemas de control de reactividad independientes que incluyen barras de control y boro soluble. Las barras de control y el sistema de control de barras están diseñados con un coeficiente positivo de inserción de barras y con ello controlar de manera segura y precisa los cambios de reactividad durante el funcionamiento normal. Dieciséis de las posiciones del conjunto de combustible contienen conjuntos de barras de control (ARC) que se dividen en dos filas: acelerador y apagado. El CVCS controla la concentración de boro soluble en el sistema de refrigeración del reactor. Se pueden hacer ajustes de concentración para tener en cuenta los cambios en la reactividad debido a la quema del núcleo, el envenenamiento por fisión y/o las

maniobras de potencia. Además, el uso de boro soluble preserva la capacidad de los ARC para reducir y proteger rápidamente los límites de diseño del combustible.

#### 4.1.4 Conversión de potencia

Una vez que el refrigerante secundario se convierte en vapor, la energía del vapor se convierte en electricidad en el sistema generador de turbina. Cada módulo está conectado a su propia turbina de vapor convencional de 60 MWe. En la Figura 22 podemos observar el diagrama de producción de potencia de cada módulo individualmente. Están fácilmente disponibles y se utilizan ampliamente en la industria de la energía de combustibles fósiles. El vapor que sale de la turbina pasa a través de un condensador, un dispositivo de limpieza de condensado y una serie de calentadores de agua de alimentación antes de volver a entrar en el generador de vapor. Las unidades de turbina y condensador están diseñadas para permitir una circulación de vapor del 100 % en la turbina, y el condensador puede enfriarse con agua o aire (para reducir el consumo de agua de la planta).

La baja potencia permite refrigerar el generador con aire, evitando los problemas de mantenimiento y seguridad asociados a la refrigeración del generador con hidrógeno. El tamaño pequeño permite montar el conjunto de turbinas sobre "raíles", lo que facilita su transporte al sitio y su desmontaje para el mantenimiento. El uso de un conjunto de turbinas separado para cada módulo elimina el riesgo de "eje único" (es decir, apagar temporalmente un solo módulo no requiere apagar toda la planta). Con los sistemas CHP, el equilibrio de la planta de energía también se puede diseñar de manera diferente para diferentes módulos, de modo que el operador pueda optimizar la eficiencia eléctrica y térmica de la planta de energía (23).

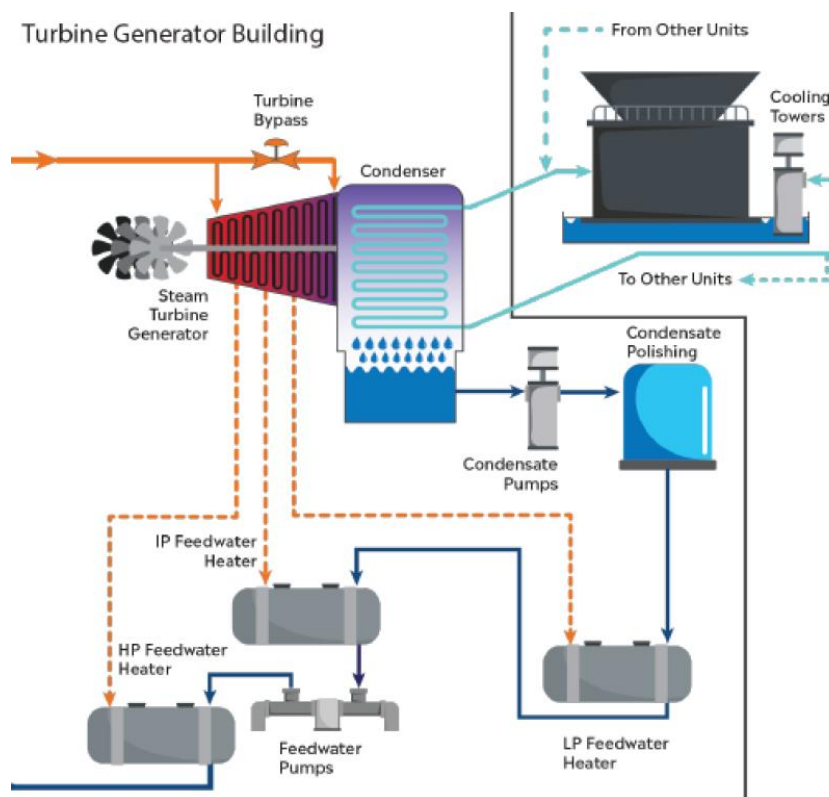


Figura 22 Esquema proceso producción electricidad NuScale (23)

### 4.1.5 Seguridad

El diseño de la instalación dota de múltiples capas de protección para mitigar los daños (defensa en profundidad), resultando en una probabilidad extremadamente baja de daño al núcleo. La instalación incluye, entre otros un conjunto de sistemas para conseguir que el núcleo se mantenga estable durante un largo periodo de tiempo. Entre las barreras para impedir la liberación de radiación encontramos; el propio combustible y su recubrimiento, la vasija del reactor, el sistema de refrigeración, la vasija de contención, la piscina del reactor y el edificio de contención, que además es de categoría I contra sismos. Los sistemas de disipación de calor y las principales funciones de mitigación de accidentes se pueden configurar y operar automáticamente; manteniendo la refrigeración del núcleo durante un período de tiempo significativo sin intervención de los operarios o una fuente de alimentación externa.

Cada módulo contiene dos sistemas de seguridad pasiva independientes y redundantes. Uno de ellos es la piscina que absorbe el calor generado la cual se denomina DHRS y el otro es el sistema de refrigeración del núcleo de emergencia, llamado ECCS. Podemos ver estos sistemas en la Figura 23, los sistemas funcionarían tanto con energía como sin ella. Además, todo el núcleo, incluida su protección y sistema de refrigeración, está sumergido en una piscina de agua la cual es capaz de absorber el calor residual de hasta 12 módulos durante más de 30 días, siendo el aire el único fluido con el que intercambia la energía, como podemos ver en la Figura 24 (23).

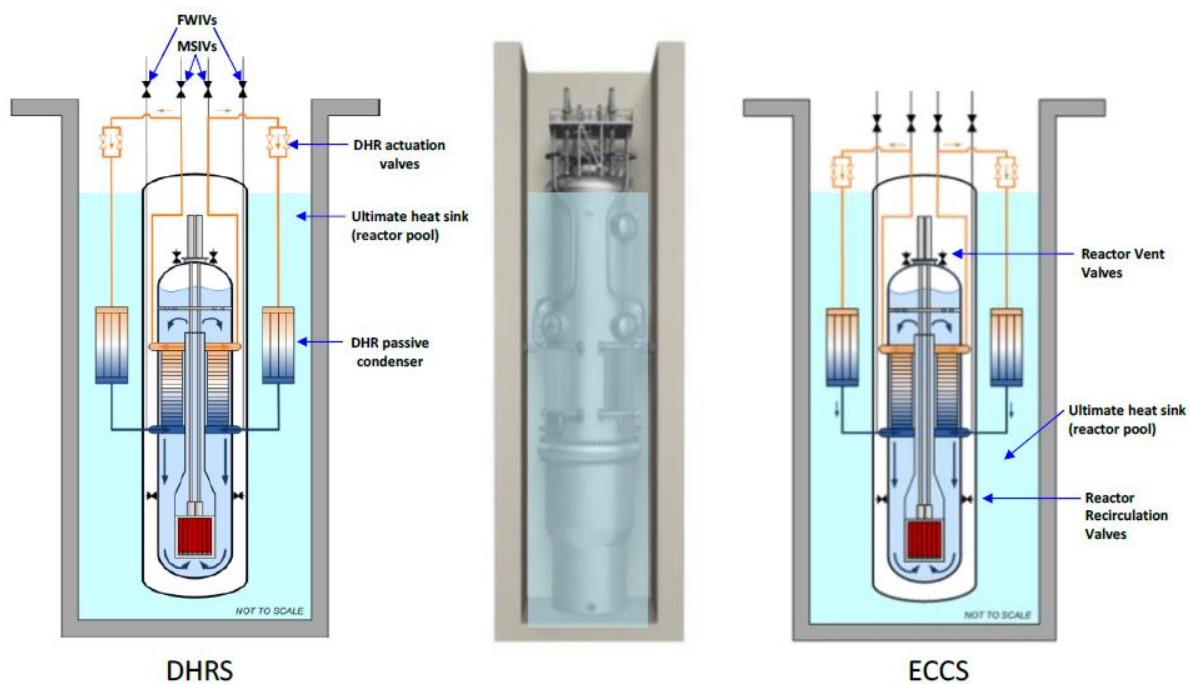


Figura 23 Sistemas de seguridad del reactor (23)

El sistema principal integrado con circulación de refrigerante natural tiene la importante ventaja de eliminar la posibilidad de pérdida de refrigerante (LOCA) al reducir el número de piezas y eliminar problemas con las tuberías externas. Las tuberías fuera de la vasija del reactor son cortas y de pequeño diámetro.

La vasija de contención tiene varias características que la diferencian de las estructuras de seguridad existentes. Durante el funcionamiento normal del reactor, se evacua la atmósfera de contención para crear un vacío aislante que reduce en gran medida la pérdida de calor de la vasija del reactor. Como resultado, la vasija del

reactor no requiere aislamiento superficial. Esto elimina la posibilidad de que los residuos de aislamiento afecten el rendimiento de enfriamiento del núcleo. Además, la presión negativa mejora la tasa de condensación de vapor en cualquier proceso en el que las válvulas de seguridad liberen vapor en ese espacio. La evacuación de los gases de seguridad evita la formación de mezclas de hidrógeno inflamables (es decir, con poco o nada de oxígeno) en el improbable caso de un accidente grave. Por último, la vasija de contención está diseñada para una presión máxima de en torno a 8,3 MPa, donde el circuito primario trabajara a una presión de 13,3 MPa y el secundario a 4,4 MPa. Esta presión de diseño limita cualquier evento de diseño que conduzca a presiones de contención elevadas.

El ECCS proporciona medios para eliminar el calor del núcleo en caso de que los haces de tubos del generador de vapor no estén disponibles para eliminar el calor del sistema primario. Funciona abriendo las válvulas de ventilación en la parte superior del reactor. El sistema disipa el calor y reduce la presión de contención a través de la condensación de vapor y la transferencia de calor por convección a la superficie interna del contenedor. Luego, el calor se transfiere a través de las paredes de la vasija de contención a la cuenca del reactor. El enfriamiento a largo plazo se logra al recircular el refrigerante del reactor a través de las válvulas de recirculación ECCS al recipiente del reactor. En el sistema primario, el vapor de la vasija del reactor se introduce en la vasija de contención, donde se condensa en la superficie de la carcasa. El condensado se acumula en el área inferior de la de contención, y cuando el nivel de líquido en la parte inferior de la contención se eleva por encima de la parte superior de las válvulas de recirculación, las válvulas de recirculación se abren para proporcionar una ruta natural de circulación desde la carcasa hasta el núcleo y sale por las válvulas de ventilación (23).

El DHRS proporciona refrigeración del reactor en el lado secundario para situaciones distintas a un LOCA cuando no se dispone de agua de alimentación por cualquier motivo. Es un sistema de refrigeración cerrado de dos etapas con circulación natural. Dispone de dos unidades de eliminación de calor de descomposición redundantes, una para cada bucle de generación de vapor. Cada unidad tiene un condensador pasivo ubicado en la cuenca del reactor que es capaz de disipar el 100% del calor generado por la fisión.

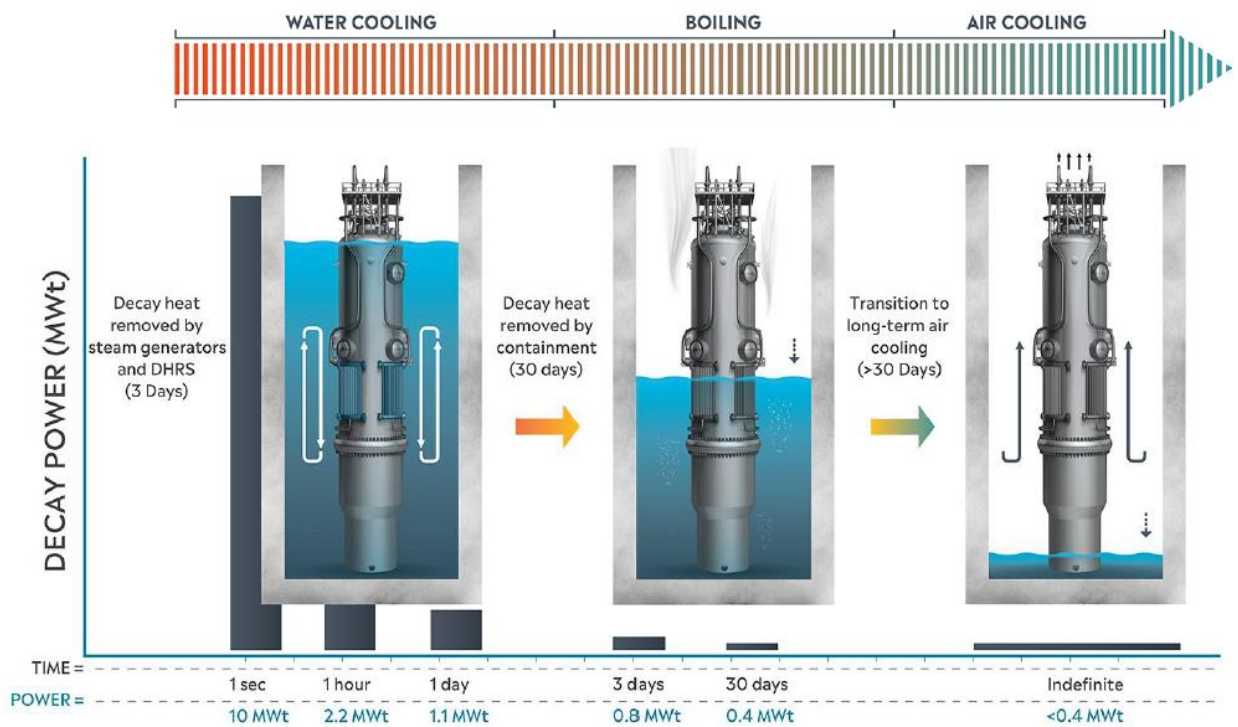
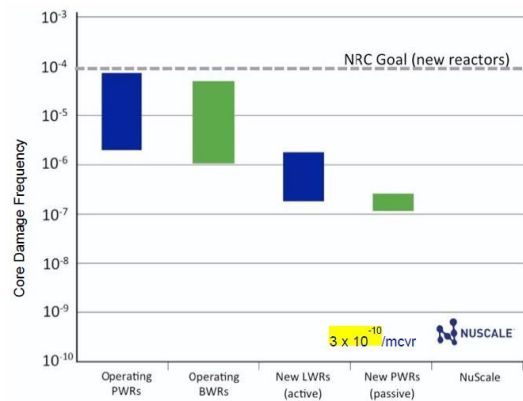


Figura 24 Sistema pasivo de absorción de calor de los reactores (23)

El diseño de estos reactores tienen características relevantes para reducir el número de accidentes graves. Esto es debido al pequeño tamaño del núcleo y la dependencia de las fuerzas impulsoras naturales, cada módulo tiene menos combustible y componentes. La vasija de contención está diseñada para que el núcleo no quede nunca expuesto al exterior ya sea por la pérdida del sistema de enfriamiento del reactor o por la ruptura de tuberías. La operación de vacío normal crea un ambiente pobre en oxígeno que reduce la formación de una mezcla de hidrógeno inflamable cuando pueda ocurrir un accidente mayor y que el dispositivo este sumergido en la piscina del reactor permite la transferencia pasiva de calor de una manera fácil y continua.

Los resultados de los estudios de evaluación de riesgos muestran que, según los supuestos de diseño de fracturas pequeñas, no existe un escenario en el que el núcleo esté expuesto o descubierto (siempre estará sumergido). Por lo tanto, los métodos de enfriamiento siempre están disponibles para eliminar el calor de la reacción. Gracias estos sistemas de disipación de calor y a las válvulas ECCS, que se abren pasivamente en caso de corte de energía, el reactor se puede enfriar de manera segura e indefinida sin corriente, sin intervención de los operadores y sin energía adicional. Además, cuando se opera a plena potencia, se estima que la frecuencia media de fallas del núcleo (CDF) de los eventos internos es de alrededor de  $3 \times 10^{-10}$  y la posibilidad de una gran liberación de productos de fisión (LRF) es de alrededor de  $2 \times 10^{-11}$  por modulo al año, lo cual es mucho menor que en GGRR, como podemos ver en la Gráfica 8. Esto es debido a la simplicidad en su diseño, a sus sistemas de seguridad pasivos, las numerosas barreras para los productos de fisión y por la independencia de cada módulo.



Gráfica 8 Reducción de riesgo (23)

Al igual que con los diseños de GGRR, la pastilla de combustible, la carcasa, la vasija del reactor y el edificio de contención evitan que los productos de fisión se transmitan a la atmósfera exterior. Además, la capacidad de equilibrar de forma fiable la hermeticidad y la presión en el reactor elimina la posibilidad de expulsar parte de un posible núcleo fundido. Como se describió anteriormente, la piscina del reactor, la estructura de acero de la piscina, el escudo biológico y finalmente el edificio del reactor representan barreras adicionales que reducen aún más la posibilidad de emisiones accidentales, todas estas barreras las podemos ver en la Figura 25. Debido a la filosofía de seguridad y su implementación, la metodología de análisis del tamaño de la zona de planificación de emergencia desarrollada por el Instituto de Energía Nuclear insta a NuScale a establecer una zona de emergencia y evacuación alrededor de la instalación, algo habitual en los GGRR (23).

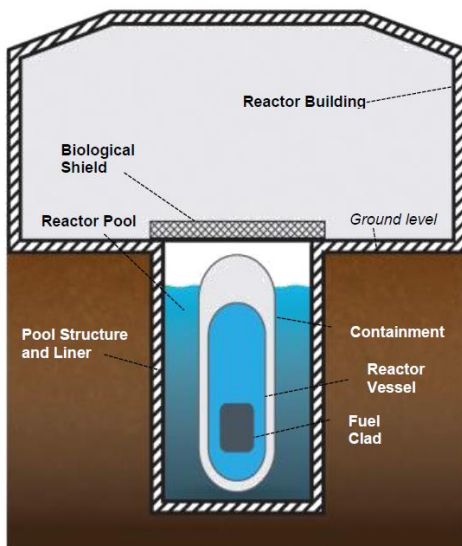


Figura 25 Barreras radiológicas (23)



## 4.2 Integral Molten Salt Reactor (IMSR-400)

El reactor está desarrollado por la empresa “Terrestrial Energy”, basada en Canadá, pero con vistas a ser comercializado al principio de su vida tanto en Canadá como en EE. UU. Ambos países están llevando conjuntamente a cabo la labor de licenciar el proyecto, demostrando así también la posibilidad de un marco legal común que una a varios países, lo cual como ya se expuso previamente es uno de los retos a superar por los SMR.

La tecnología en la que en gran parte se basa este diseño ya ha sido demostrada, en parte, gracias a un reactor de sales fundidas del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL) llevado a cabo entre los años 1950 y 1970. Este proyecto llevó a cabo una amplia investigación tanto en materiales como equipos para el reactor. Estos incluían grafito como moderador de neutrones o tanques de drenaje de sal. El programa ORNL resultó en la construcción y operación exitosa del experimento del reactor de sal (MSRE). El MSRE usaba sales fundidas con el propio combustible, que además también era el refrigerante del circuito primario. Esta mezcla de combustible y refrigerante circulaba entre el núcleo de grafito y los intercambiadores de calor externos.

El IMSR es una versión reconfigurada y ampliada del MSRE. Esto supone una gran ventaja para el desarrollo de este diseño ya que minimiza la investigación y la inversión necesarios. El IMSR también se apoya en el desarrollo de otro reactor llevado a cabo por el ORNL, un reactor modular pequeño de alta temperatura, el SmAHTR, es un reactor con una capacidad de 125 MWt y que como diferencia principal con el IMSR es que este usará como combustible las sales en estado sólido, siguiendo el mismo principio, el combustible estará mezclado con la sal (27).

En concreto el IMSR-400, es un SMR de 400 MWt que producirá 194 MWe por cada módulo instalado, cada unidad alimentada con uranio enriquecido al 4,95 %, en forma de UF<sub>4</sub>, el cual se encuentra mezclado con las sales fundidas del propio reactor que también actúan como refrigerante principal.

### Hitos en el desarrollo

- **2013** – Terrestrial Energy comienza el proyecto
- **2015** – Se finaliza el diseño conceptual y comienza el diseño en detalle
- **2017** – Comienzan a trabajar en el diseño en los Laboratorios Nacionales de Canadá
- **2018** – Se completa la primera revisión del diseño del reactor
- **2025-2030** – Se espera que termine el proceso legal y se comience la construcción (28)

### 4.2.1 Diseño de la planta

El tamaño de la planta se espera que no supere las 7 hectáreas de superficie, lo que haría que tuviese una de las mayores relaciones potencia frente a superficie ocupada. Este pequeño tamaño también facilitará una gran flexibilidad en cuanto a su localización, ya que se podrán manejar muchas más opciones además de que el impacto visual será mucho menor, algo muy importante y de lo cual se hablará en el capítulo 5, en la Figura 26 podemos observar cómo será su distribución.

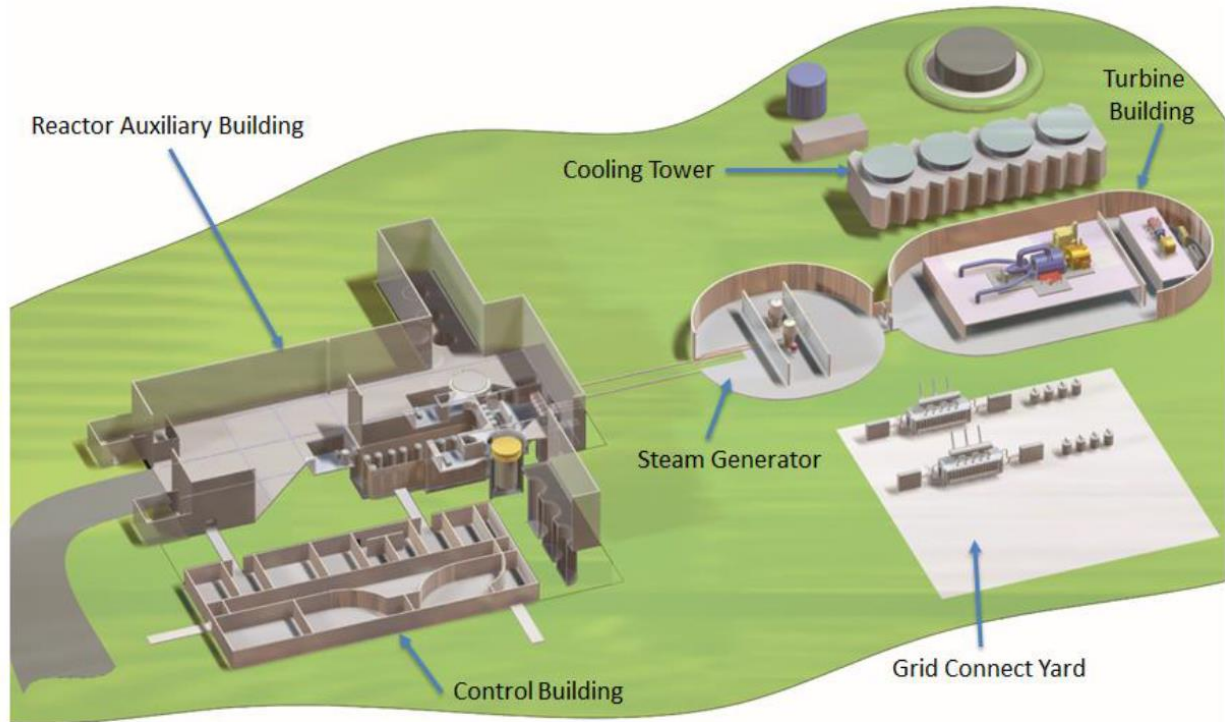


Figura 26 Layout planta IMSR – 400 (29)

La instalación IMSR está diseñada para poder funcionar tanto como la carga base del lugar donde se halle como también servir de carga de seguimiento para los picos de demanda o cuando haya necesidad. El propio edificio del reactor será de fácil construcción lo que permite una construcción rápida, el edificio industrial es simple y liviano, ya que no realiza funciones básicas de seguridad; todo esto está garantizado por sistemas del propio reactor y su entorno, ya que todas las barreras necesarias de seguridad y radiación se encontrarán bajo tierra en torno al propio núcleo del reactor.

#### 4.2.2 Diseño del reactor

Este es un SMR diseñado para producir 400 MWt a una temperatura en torno a los 600 °C, alimentado por combustible en sales fundidas enriquecidas entre el 2 y el 5 %. La diferencia principal de este planta con otros reactores nucleares está precisamente en el combustible, ya que utiliza combustible líquido a baja presión y a una alta temperatura. Este reactor se diseña como una sola unidad sellada, que alberga el propio núcleo, las bombas, los intercambiadores de calor y las barras de control. Se pretende que tenga una vida útil de 7 años, y en dicho momento se reemplazará como una unidad, es decir, en ningún momento será necesaria su apertura, es decir, una vez que se ensamble en la fábrica no será necesario manipular ningún componente interno, además de que todos los sistemas serán redundantes.

El IMSR utiliza sal de flúor fundida como sal combustible base, que es un líquido inerte altamente estable con una gran capacidad térmica y con una gran retención de radionúclidos, que además funciona como refrigerante en el circuito primario. En el circuito secundario, también con sales de flúor, pero sin combustible, se transfiere el calor de los intercambiadores primarios integrados en la unidad central. Esta energía se transfiere al ciclo de sal solar, que se bombea desde el edificio del reactor a un edificio separado, donde llega a los generadores de vapor que producen vapor sobrecalentado para generar electricidad, o bien se podría utilizar para aplicaciones que requieran altas temperaturas, ya que como hemos comentado previamente la temperatura de trabajo ronda los 600 °C frente a los 300 °C que suele manejar un GR. Todo este ciclo lo podemos ver en la Figura 27, donde

observamos perfectamente el propio reactor que se dibuja como una unidad y que alberga todos los sistemas antes descritos y vemos además donde el combustible denominado “*fuel salt*”, se mueve alrededor del núcleo y a través del “*core*”, que son las barras de grafito que actúa como moderador.

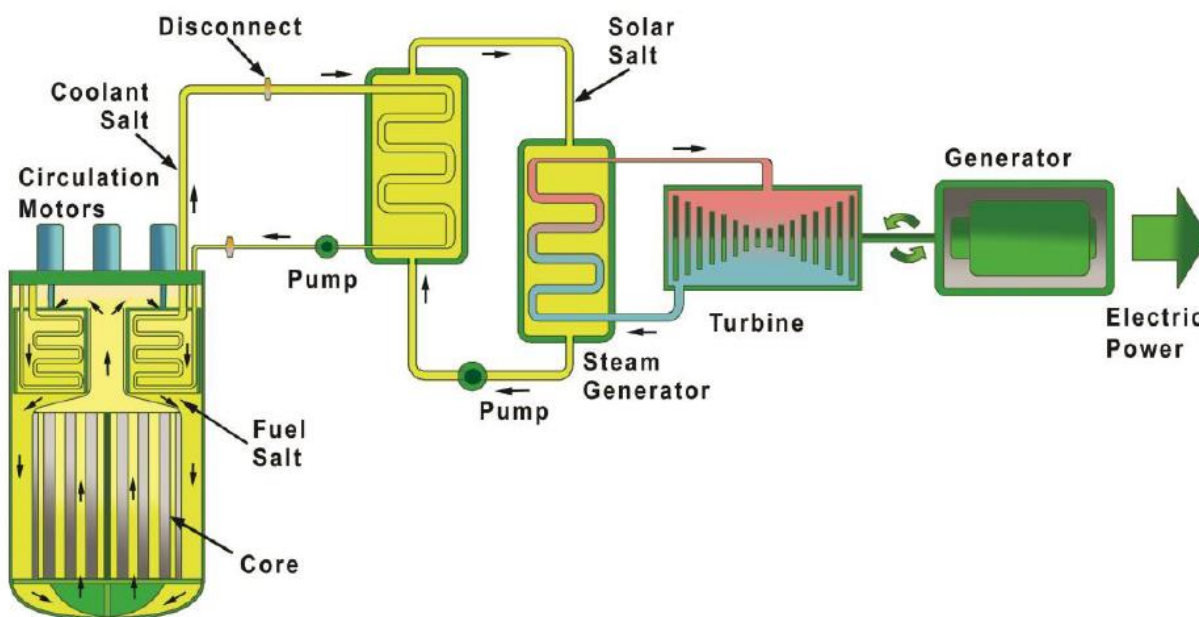


Figura 27 Esquemas de la producción de potencia del IMSR – 400 (29)

El IMSR es un reactor nuclear integrado, esto significa que el núcleo del reactor, las bombas, los intercambiadores de calor y las barras de control se construyen en una sola vasija de contención. Esta construcción se realiza en un ambiente de fábrica controlado, luego se transporta a la planta del reactor, donde después del ensamblaje final, se baja al tanque (de protección), que a su vez se encuentra en el silo subterráneo del reactor, allí, la unidad central se conecta a una tubería secundaria que contiene sal refrigerante no radiactiva, todas estas parte las podemos ver en la. Para mejorar las condiciones de funcionamiento y seguridad este refrigerante se utiliza como circuito intermedio neutro de baja presión entre el circuito crítico del reactor y el circuito de generación de energía de vapor. El circuito de vapor acciona una turbina de vapor industrial convencional para generación de energía y/o generación de vapor industrial, según el destino de la energía generada. Además, parte o la totalidad de la sal fundida caliente se puede enviar directamente al propio proceso donde fuese necesaria.

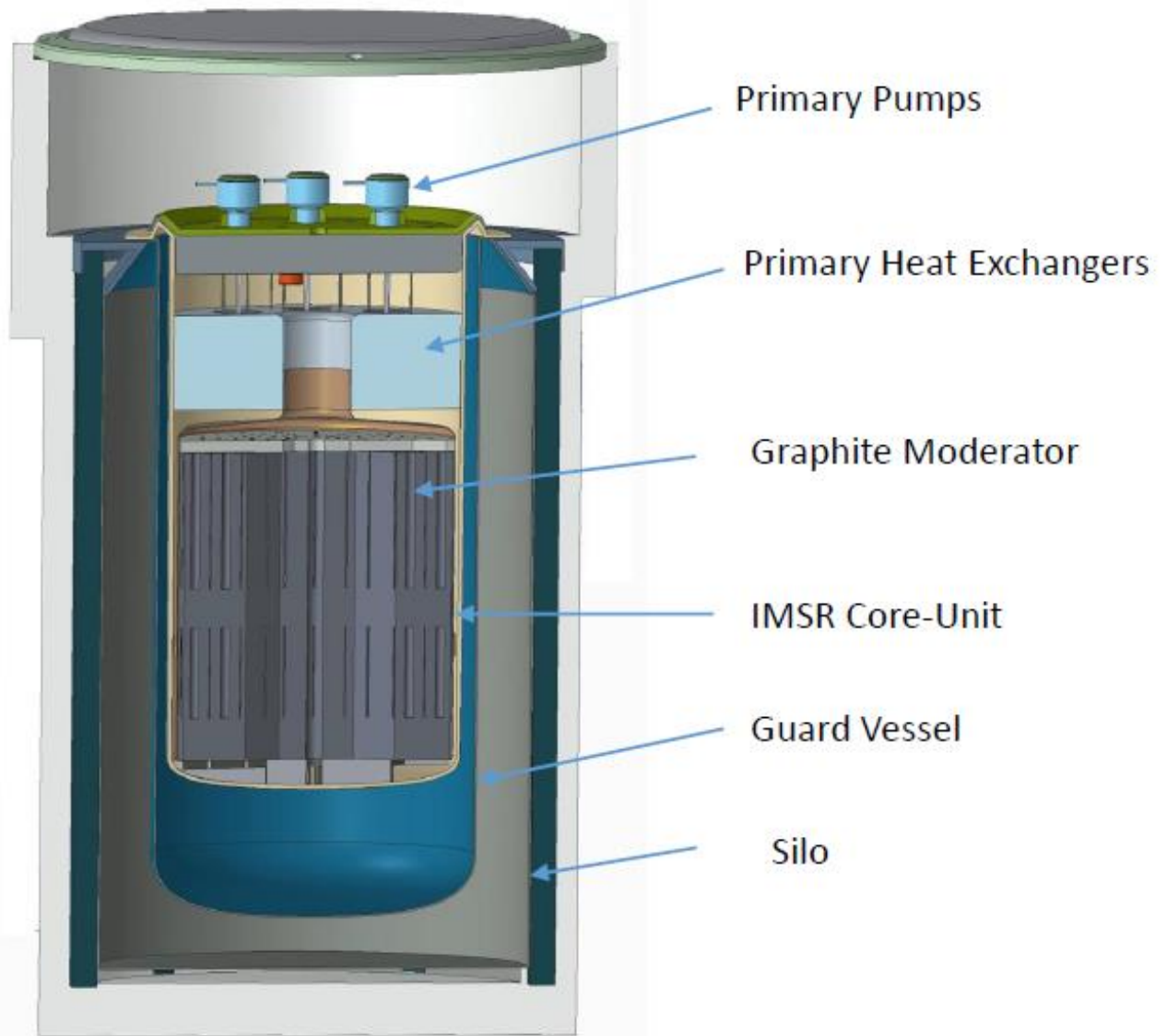


Figura 28 Estructura del reactor IMSR – 400 (29)

El reactor usa grafito como moderador, donde el IMSR utiliza sus propias características de diseño y de seguridad para tener un coeficiente de temperatura negativo, donde ante cualquier elevación de la temperatura hará que el proceso de fisión se reduzca. En un reactor como este nos encontramos tres factores que afectan principalmente al coeficiente de temperatura, los cuales son: el efecto Doppler, la densidad de sal del combustible y la temperatura del grafito. El efecto Doppler es siempre un término negativo y corresponde a la propiedad de ciertos isótopos a la retroalimentación derivada del aumento de temperatura en los reactores nucleares, tiene un efecto auto estabilizador (como el del moderador), lo cual lo convierte en algo beneficioso para la seguridad de los propios reactores nucleares. El aumento de la temperatura tendrá como resultado también la reducción de la densidad de la sal en el combustible y esto tiene dos efectos principales, una disminución de la relación combustible frente al moderador y aumento de la fuga de neutrones del núcleo activo (29).

El combustible puede ser fluoruro de uranio poco enriquecido, fluoruro de plutonio, fluoruro de torio o alguna mezcla de estos. Sin embargo, este reactor utiliza un ciclo de combustible desechable de uranio de bajo enriquecimiento, ya que es la opción más simple. Esta sal combustible se diluye con una sal refrigerante que consiste en fluoruros tales como fluoruro de sodio, fluoruro de berilio o fluoruro de litio. Esta mezcla forma tanto el combustible como el refrigerante principal. La mezcla de combustible y refrigerante se bombea entre el núcleo moderado de grafito y luego a través de intercambiadores de calor integrados para transferir calor al circuito de sal de enfriamiento secundario. Este último ciclo consiste en sales puras (sin adición de sal combustible) que a su vez transfieren el calor a otro ciclo salino intermedio. Este segundo circuito de sal o tercer circuito mejora la seguridad al agregar otra barrera entre la carga radiactiva primaria y la turbina de vapor. Esta tercera ronda utiliza una sal de nitrato debido a su menor punto de fusión (para evitar la congelación del generador de vapor) y compatibilidad con el vapor (en caso de fuga). Finalmente, un generador de vapor alimentado con nitrato produce vapor para generar calor de proceso o para impulsar un generador de turbina de vapor.

Después de aproximadamente 7 años de suministro de energía, la unidad central se apaga y después de una fase de enfriamiento, el propio combustible gastado se bombea a tanques de almacenamiento dentro de la propia contención. La unidad ya vaciada y usada se deja enfriar durante varios años, después de lo cual la radiactividad decae hasta el punto en que puede retirarse con seguridad del silo de contención. El IMSR400 consta de una sola pieza, pero se utilizan dos silos de unidad central para cambiar la carga del silo. Esto permite que el silo usado se enfríe durante mucho tiempo, mientras que el segundo silo se conecta a la nueva unidad cambiando las líneas de sales secundarias. Después de este largo período de enfriamiento, la unidad central vacía usada se transporta a un silo para almacenamiento a largo plazo, donde puede permanecer por un período de tiempo más largo. Tras este periodo, la vasija de contención se puede volver a transportar para su reciclaje o para su deposición permanente en un AGP. Del mismo modo, el propio combustible gastado almacenado por separado se puede enviar a una instalación para la recuperación combustible para su uso. Esta arquitectura de reactor (como único elemento) y el diseño del ciclo de combustible permiten que la planta de energía opere siempre en un ambiente seguro y más sencillo que un GR, sin el riesgo de contaminación de la planta (29).

### 4.2.3 Núcleo y combustible

Este reactor utiliza combustible nuclear con una eficiencia mayor que los reactores de agua ligera. Esto es así debido a tres factores principales que influyen en ello, estos son:

- La eficiencia térmica es alta donde a pesar de su reducido tamaño, la eficiencia del IMSR400 es superior a la de los reactores de agua ligera. Por ejemplo, si el IMSR400 produce 185-192 MWe con una capacidad de 400 MWt, obtenemos una eficiencia neta de entre el 46 y 48 %.
- El consumo de combustible (burn-up) es alto, en lugar de retirar el combustible del reactor, simplemente se agrega combustible nuevo a la carga total de combustible que constituye el núcleo del reactor.
- Ya que el propio combustible se encuentra diluido en las sales y sin estructuras metálicas internas ni H<sub>2</sub>O, el diseño IMSR permite una salida pasiva de xenón desde el núcleo, el cuál es un veneno.

Una de las ventajas del diseño es que el combustible líquido usado es mucho más fácil de reciclar que las barras de combustible sólido además como el combustible no se degrada, se puede reciclar muchas veces. Si se utiliza el reciclaje de combustible, lo cual Terrestrial Energy cree que será así se realizará en un complejo centralizado de recuperación de combustible que dará servicio a múltiples plantas de energía IMSR.

Otra aspecto a destacar es el de los materiales que se usan para la construcción, ya que como se ha expuesto previamente alcanzamos temperaturas muy altas, lo cual haría necesitar materiales especiales para que no se degradasen con el tiempo, sin embargo, como la vida útil está estimada en 7 años, no se requerirán materiales o aleaciones especiales y por lo tanto caras para la construcción de los núcleos. Esto también se debe a la baja presión de operación y la falta de energía almacenada en las sales, lo que elimina la necesidad de grandes recipientes a presión, soportes de tuberías y edificios de protección. La alta presión se limita a la planta de turbina de vapor, que es un elemento industrial muy compacta. Las sales también tienen una alta capacidad calorífica volumétrica, lo que da como resultado intercambiadores de calor, bombas y otros equipos de transferencia de calor compactos. El resultado son unidades muy compactas y edificios pequeños.

El ciclo de combustible para el ISMR más simple será con una única recarga en toda su vida útil. El proceso sería el siguiente, cada unidad se pondría en marcha con una cantidad sustancial (menor que la máxima) de combustible en el núcleo, con una concentración de  $UF_4$  menor del 2 % y después a lo largo de los años se completaría la carga de combustible posible, con una mezcla de sales similar, salvo que el enriquecimiento aumentaría al 4,95 %. Este combustible se transporta por separado como sólido a la planta, donde se funde y alimenta al núcleo, esto significa que IMSR se puede operar con reabastecimiento en línea. Además, a diferencia de los reactores de combustible sólido, no es necesario retirar el combustible antiguo durante la recarga, todo el combustible permanece en la unidad principal mientras el reactor está en funcionamiento. A diferencia de otros sistemas de plantas de potencia actuales, el núcleo nunca se abrirá en las instalaciones, ya sea durante el arranque o el reabastecimiento de combustible.

Este ciclo de combustible es relativamente eficiente en términos de necesidad de uranio (similar al nivel de diseños de LWR pequeños) y también debido al considerable consumo de Pu producido in situ, la cantidad de Pu en el combustible consumido es bastante menor que en un reactor LWR o CANDU (Canadian Uranium Deuterio) por MWe. Sin embargo, este ciclo hace que se acumule una cantidad significativa de sal de combustible en la propia instalación en una planta cuya vida útil se estima en unos 60 años (30).

El ciclo de combustible para este reactor se ha centrado principalmente en una sola recarga o en alguna opción de recarga parcial durante su funcionamiento. Estas opciones son económicamente viables y representan una mejora con respecto a un LWR en términos de cantidad de Pu desperdiciado y otros elementos transuránicos. Este combustible se transporta por separado como sólido a la planta de energía, donde se funde y alimenta a la unidad base IMSR. Esto significa que IMSR se puede operar con reabastecimiento en línea. Además, a diferencia de los reactores de combustible sólido, no es necesario retirar el combustible antiguo durante la recarga. Todo el combustible permanece en la unidad principal sellada del IMSR mientras el procesador está en funcionamiento. A diferencia de otros sistemas de reactores de plantas de energía, el paquete de zona IMSR nunca debe abrirse en la planta de energía, ya sea durante el arranque o el reabastecimiento de combustible (29).

#### 4.2.4 Conversión de potencia

La propia turbina y sus sistemas auxiliares no cumplen ninguna misión de seguridad ya que como hemos comentado no se necesitan sistemas externos al reactor para su parada segura o en una situación de emergencia. Por lo tanto, este reactor utilizará turbinas de vapor industriales estándar, usando un ciclo Rankine recalentado, donde nos encontraremos un cuerpo de alta presión y otro cuerpo de baja presión, estarán diseñadas para soportar como máximo 19 MPa y 585 °C. El uso de una turbina estándar evita la necesidad de desarrollar una nueva turbina y un sistema de control para el IMSR y permite el uso de turbinas disponibles ya

en el mercado y con un amplio uso en años pasados. Estas turbinas de vapor son extremadamente flexibles lo que es una gran ventaja debido a las distintas finalidades que puede tener la energía producida por el reactor. Esto otorga a la planta acceso a muchos mercados industriales de energía y calor, como la producción química, producción de papel o la desalinización. El generador de la turbina es de construcción simple y compacta que se puede montar sobre raíles.

#### 4.2.5 Seguridad

En general, todas las instalaciones nucleares deben cumplir tres aspectos fundamentales: la reacción en cadena debe estar controlada, debe asegurarse el suministro de refrigerante para asegurar la evacuación de la energía generada en el núcleo y los productos radiactivos de la reacción deben ser contenidos dentro de la planta. El diseño de esta planta asegura que para cualquier situación prevista o no, no sea necesarios operarios, electricidad o mecanismos alimentados con fuentes externas para asegurar tres factores esenciales como son: el control de la reacción, la refrigeración y la contención.

Una parte importante de la seguridad del IMSR es eliminar toda la posible radiación emitida al ambiente, por ello, el reactor siempre funciona a baja presión debido a una mezcla de refrigerante-combustible inerte y de baja volatilidad y a la ausencia de agua o vapor en el reactor. Dado que los materiales utilizados en el sistema del reactor e incluso los sistemas auxiliares son químicamente compatibles entre sí, no son posibles reacciones químicas dañinas como la formación de hidrógeno o la reacción del sodio presente en las sales con el aire o el agua, el resultado es un sistema intrínsecamente seguro simple y robusto.

En el caso de los reactores de agua ligera, el concepto de seguridad se centra en si los componentes del núcleo circula suficiente refrigerante. Estos procesos se llevan a cabo a alta presión y los accidentes por pérdida de refrigerante (LOCA), como fugas o roturas de tuberías, requieren una despresurización segura seguida de una inyección de refrigerante a baja presión. Estos sistemas requieren un gran abanico de sistemas mecánicos, eléctricos y de control, sensores y otros sistemas de apoyo para operar de manera segura y precisa. En el IMSR la seguridad no se trata de presurizar el reactor o introducir refrigerante en el núcleo, todas las funciones necesarias de control y disipador de calor ya están donde se necesitan: dentro y alrededor de la unidad central IMSR. En consecuencia, el IMSR elimina por completo la dependencia de los sistemas de apoyo, válvulas, bombas y acciones del operador. Para que esto sea posible, los diseñadores de IMSR combinaron la tecnología del reactor de sales fundidas con un diseño de reactor integrado y un sistema de enfriamiento único.

Este sistema de refrigeración único se basa en la capacidad calorífica y la pérdida de calor, los cuales son constantes. La capacidad calorífica proviene de la masa térmica de la sal con combustible, el metal del tanque y el grafito, donde la pérdida de calor se produce porque la vasija del reactor no está aislada. El enfriamiento a corto plazo es proporcionado por el ensamblaje del núcleo de baja densidad de potencia y la circulación natural interna de la sal, lo que resulta en una alta capacidad para absorber la generación de calor. El enfriamiento a largo plazo se realiza por la pérdida de calor en la vasija del reactor sin aislar, que nuevamente está encerrada en una vasija de contención. El contenedor o vasija de contención es un elemento cerrado que encierra la vasija del reactor y brinda protección y enfriamiento a través de la pared del contenedor. La vasija de contención está rodeada por una enorme camisa de refrigeración por aire, todo este proceso lo podemos ver en la Figura 29. Esta camisa de refrigeración garantiza una refrigeración duradera, opera a presión atmosférica, por lo que continuará enfriándose si hay una fuga o daño en la camisa de enfriamiento. La vasija de contención actúa como una barrera hermética adicional en el caso extremadamente improbable de que el ensamblaje del núcleo sufra alguna avería o desperfecto importante. El silo en sí está cubierto en la parte superior con gruesos paneles horizontales de acero, estos paneles también protegen contra eventos externos extremos, como accidentes aéreos u ondas de choque y proporcionan un disipador de calor adicional en caso de sobrecalentamiento.

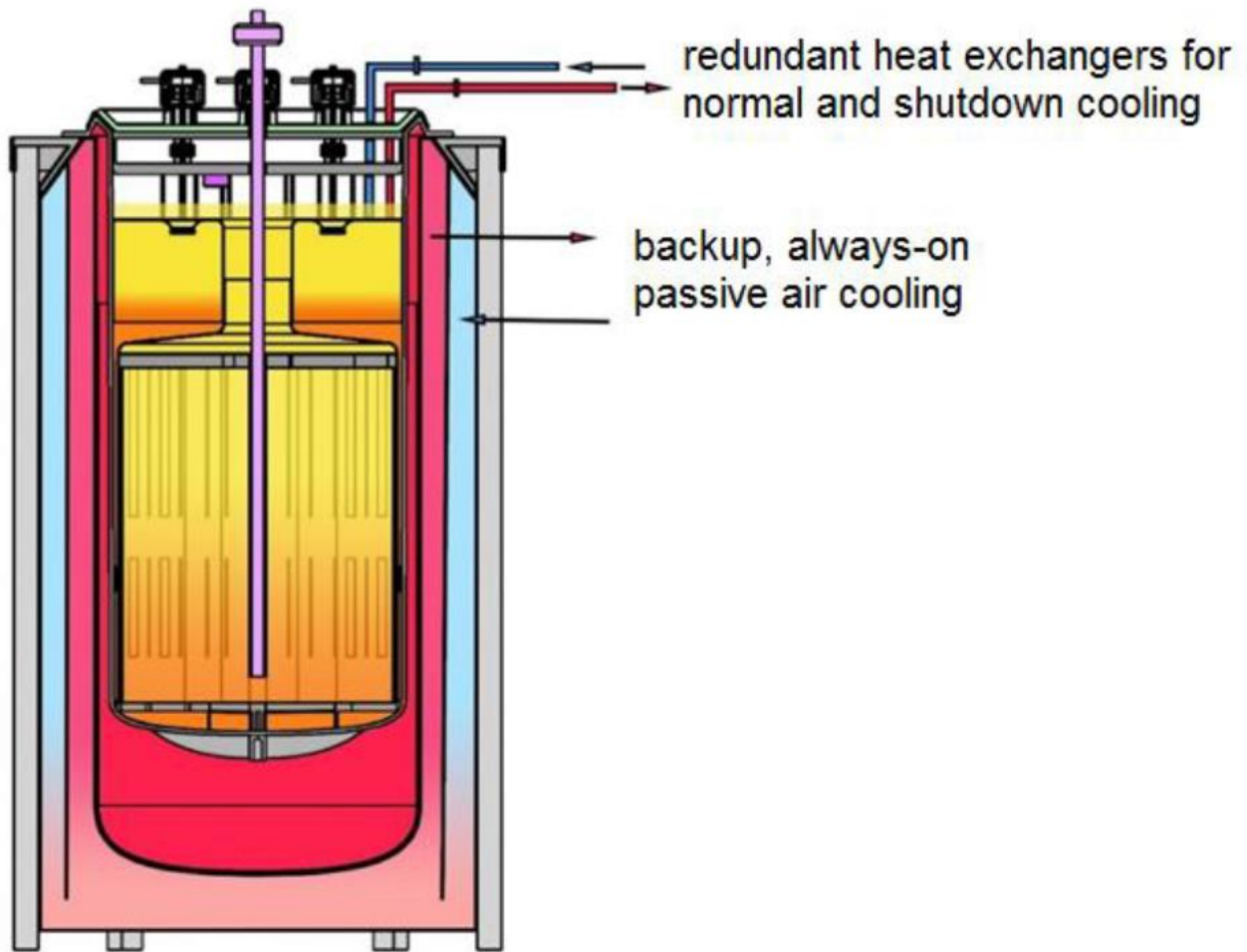


Figura 29 Sistema pasivo de enfriamiento del IMSR – 400 (29)

Este reactor y sus instalaciones tiene un perfil sísmico muy atractivo debido a su sistema primario compacto e integral. Además, el silo subterráneo que alberga la unidad central y los edificios de bajo perfil proporcionan un centro de gravedad muy bajo. Además del sistema del reactor y los propios edificios, los terremotos a menudo pueden poner en peligro los sistemas de apoyo, como la red eléctrica, la energía de emergencia, la energía de las baterías, los sistemas de instrumentación y control, las líneas de inyección de refrigerante de emergencia o los sistemas neumáticos e hidráulicos pero debido a que el IMSR no depende de ninguno de estos sistemas de soporte, la seguridad de IMSR es intrínsecamente resistente a los terremotos.

Respecto a la proliferación para armas este diseño de reactor ofrece varias barreras, el propio ciclo del combustible dificulta esto, ya que no se utiliza uranio altamente enriquecido y además no hay ningún tipo de manipulación del combustible usado en las instalaciones por lo que la separación de elementos no sería posible en las propias instalaciones. Además, todas las posibles zonas de extracción para seguimiento o para introducir combustible serán físicamente inaccesibles para el personal y aquellos procesos de mayor importancia como completar el combustible dentro del núcleo estarán totalmente supervisados y estandarizados.

Respecto a las barreras físicas, este es un reactor de sales fundidas con un ciclo de enfriamiento de combustible primario altamente radiactivo. Además, debido a las altas temperaturas de operación, se utilizan celdas y sistemas especialmente blindados y aislados. Estas características hacen que el diseño del reactor sea



extremadamente resistente a posibles sabotajes o atentados terroristas, también utiliza una arquitectura integrada, como un único elemento para crear una unidad, junto al intercambiador de calor primario del núcleo, compacta, robusta y completamente cerrada. Otra característica de diseño que brinda protección contra amenazas externas es la introducción del reactor en un silo subterráneo reforzado como celda de separación para el conjunto principal, esta construcción endurecida y subterránea proporciona una excelente protección contra cualquier situación externa. El ensamblaje del núcleo en sí tiene capas adicionales de protección, una caja protectora sellada que rodea la parte inferior y los lados del ensamblaje del núcleo además de una placa protectora de acero en la parte superior (29).



# 5 ANÁLISIS DE RIESGOS DE LOS SMR

---

**U**no de los aspectos más importante a tener en cuenta a la hora de desarrollar y comercializar cualquier tecnología es hacer un estudio o estimación de los posibles impactos medioambientales que puede producir y de todas las medidas de seguridad que se deben tomar para que estos sean los mínimos posibles. Aún más importante será si hablamos de una tecnología nuclear, como es el caso de los SMR. Trataremos tanto la seguridad en sus instalaciones como el impacto medioambiental desde dos posibles situaciones: durante la operación normal de la instalación y durante un posible accidente que ocurra durante el funcionamiento. En el caso de la operación normal los SMR, pueden tener impactos en el medio distintos a los de los reactores hasta ahora construidos. No así en el caso de las consecuencias tras un posible accidente donde las organizaciones internacionales las consideran semejantes a un reactor de gran tamaño.

## 5.1 Seguridad en los SMR y sus instalaciones

La seguridad nuclear tiene el objetivo de proteger a las personas y al entorno de los efectos dañinos de la radiación, derivada de la emisión de productos radiactivos ya sea por un accidente o debido a un ataque intencionado a la instalación, además también se incluye dentro de este aspecto proporcionar barreras para que la tecnología en torno a los reactores no se pueda derivar para su uso militar y armamentístico. Se busca así reducir el riesgo para las instalaciones ya sea desde un individuo o grupo externo que busca robar tecnología nuclear o causar daño a la zona y sus habitantes con la destrucción total o parcial de la planta de potencia, o desde un individuo que trabaje en la propia instalación y que tenga los mismo objetivos. Los métodos con los que pueden causar daños a la instalación han ido evolucionando con el paso del tiempo y con el desarrollo de nuevas tecnologías, se ha puesto énfasis en los últimos años en el riesgo que suponen los ciberataques. Con el paso de los años y el desarrollo de nuevas tecnologías las centrales han dejado de usar circuitos cerrados en torno a la central, no están aisladas de la red externa como se podría pensar en un principio. Los SMR podrían utilizar conexiones como una VPN (Virtual Private Network), si estas conexiones no se blindan y aseguran correctamente podrían ser vulnerables frente a hackers. También podría corromperse el sistema o infectarlo a través de dispositivos y puertos físicos, ya sean memorias flash o discos de memoria (HDD o SSD). Además, como muchos de los SMR se construirán y ensamblarán total o parcialmente en fábricas se deberán blindar también estas instalaciones frente a posibles ciberataques, que puedan poner en peligro o colapsar la cadena de montaje. Hay otro tipo de riesgos en torno a la ciberseguridad de los SMR y si usarán sistemas de monitorización y control a distancia, por ejemplo, si el operario puede acceder remotamente a las cámaras de vigilancia o a sistemas electrónicos, esto crea un punto débil para los ataques de hackers, por lo que diseñar sistemas remotos de control y vigilancia será algo complicado (31).

Por otro lado, también suponen un reto para la seguridad los reactores que están en zonas aisladas, instalados en plataformas flotantes o durante el transporte de los núcleos del lugar de fabricación a su destino. Para las zonas aisladas podemos plantear una serie de cuestiones, ya que al estar en un lugar remoto donde el acceso sea complicado es posible que los requerimientos de seguridad disminuyan, ya que se reduce la posibilidad de un ataque terrorista y en el caso de un fallo o accidente interno las consecuencias serán menores debido a su localización, sin embargo al estar en una zona remota, el control y el seguimiento a distancia parece una opción adecuada pero lo expondríamos a los peligros antes explicados en torno a los ciberataques. Así para los reactores en plataformas flotantes o en zonas remotas, la localización y su dificultad de acceso suponen tanto una ventaja como una desventaja, las posibles amenazas pueden ser menores pero el transporte del

combustible o cualquier parte de la instalación también sería más complicado. Sería más difícil para las posibles amenazas acceder, pero si lo consiguiesen también sería complicado el acceso de las fuerzas de rescate y por lo tanto el tiempo aumentaría y con ello la posibilidad de un accidente grave, cuyas consecuencias serían menores debido a la localización (32).

Para el caso del transporte de los SMR como podemos ver en la Figura 30, algo clave en su ciclo de vida, quizás sea uno de los aspectos más importantes para tener en cuenta y que suponga un mayor reto. Ya que el propio traslado de las distintas partes de la planta suponen un punto débil en el proceso que puede suponer un objetivo para las amenazas externas es evidente que durante este proceso se exponen a vulnerabilidades que no existirían en un entorno controlado, pero que aun así no podemos evitar, pero si mitigar. Ya que por ejemplo el transporte en carretera está expuesto a muchas variables, que pueden suponer un peligro, por lo que lo único que podremos hacer será detectar y adelantarse a las posibles situaciones peligrosas, es evidente que si se crease un sistema de transporte propio las posibilidades de un accidente o ataque disminuirían en gran medida, sin embargo aumentaría el coste inicial y obligaría a los países a hacer una gran inversión en este tipo de estructuras para poder acceder a los SMR, teniendo en cuenta además que una de las ventajas que proponen los SMR es el uso de sistemas de transporte ya existentes (31).



Figura 30 Ejemplos de transportes para SMR (32)

Otra de las cuestiones más importantes a tratar en torno a la seguridad es el personal, se estima que los costes asociados a la seguridad son de en torno al 15-25 % del coste total de operación, donde el mayor porcentaje se invierte en personal (31). Así reducir el número de personal de seguridad es una forma de reducir costes, lo cual es vital para el desarrollo de los SMR y los propios desarrolladores insisten en que las propias características de seguridad inherentes a los SMR puede ser una razón para reducir el tamaño de la fuerza de seguridad, lo cual es clave en dicho ahorro pero que genera mucha controversia. Reducir el número de personal de seguridad armado puede tener una serie de consecuencias, si el número de atacantes fuese mayor que el equipo en sí la probabilidad de neutralizar la amenaza sería menor, además de que debemos partir de que no podemos infravalorar a nuestro adversario el equipo se debe preparar para lo peor, lo cual será más complicado si el ataque es por grupos separados o en plantas SMR con varios núcleos con lo que los posibles objetivos a defender aumentan. Para los futuros proyectos se deberá elegir el número de personal tanto desarmado como armado, dependiendo de factores como la aplicación del reactor, el tamaño de la planta o su localización (32).

Como se ha hablado durante todo el documento, mucho de los reactores se basan en tecnologías ya comercializadas y otros están siendo desarrollados con tecnologías nunca puestas en funcionamiento, por lo que las normativas actuales no se adaptan a estos proyectos. Para los reactores basados en GGRR actuales lo más probable es que sea suficiente con adaptar las normativas actuales, sin embargo, para los nuevos reactores de Generación IV será necesario crear una normativa nueva, unos de los mayores retos a superar a nivel

legislativo, serán las situaciones generadas por la fabricación del SMR en un país para ser enviado a otro o la existencia de diversas fábricas en un mismo país.

Como en cualquier dispositivo nuclear y como se ha expuesto a lo largo del documento, se deben crear barreras que eviten el uso de dicha tecnología para fines no pacíficos. Dentro de la perspectiva militar, tienen un gran futuro como fuente de energía segura y fiable, ya que las instalaciones militares que dependen de la red externa pueden verse comprometidas, ya sea por causas del medio o por ataques intencionados y donde actualmente se usan generadores diésel para suplir la falta de potencia en estas situaciones o de forma constante si no existe la posibilidad de que la base se conecte a la red, por ejemplo, en el caso de que la instalación militar se encuentre en territorio de un país que no sea aliado. Pero debemos tener en cuenta que una vez que se construyan y se transporten al lugar de producción, podría ser en cualquier país y dicha tecnología quedaría en sus manos, por lo que podrían ser usados con fines no pacíficos sobre todo teniendo en cuenta que muchos de los diseños de los SMR usarán HALEU (32).

## **5.2 Impacto medio ambiental**

### **5.2.1 Potenciales impactos en el funcionamiento normal**

Como hemos comentado en este caso el impacto de los SMR puede variar frente a los de un reactor de gran tamaño, pero en general no lo hará de una forma muy significativa, así distinguiremos las siguientes categorías: atmosférica, suelo, medio acuático, geológico, vida marina y su hábitat, vida terrestre y su hábitat, salud humana, contaminación visual, transporte, residuos {a lo mejor cambiar ciertos puntos.

#### **5.2.1.1 Impacto en la atmósfera**

Las fuentes de posibles contaminaciones atmosféricas durante el ciclo de vida de un SMR vendrán de la producción de gases de la maquinaria de construcción y operación, polvo y partículas, además de la liberación controlada de residuos radiactivos y no-radiactivos.

#### **5.2.1.2 Construcción**

Durante la fase de construcción, tanto si es en el mar como si es en tierra, la contaminación vendrá de los gases expulsados por la maquinaria. Además del polvo y tierra levantados durante las excavaciones o posibles explosiones en el lugar de asentamiento. La importancia de los efectos sobre la calidad del aire, pueden variar según el tipo de SMR en construcción. Los SMR construidos en el agua son diseñados para que tengan menos estructuras, que uno construido en tierra firme. El carácter modular de los SMR implica que no todo el proceso de construcción se lleve a cabo en el mismo lugar, por lo que implicaría un menos impacto en su destino final

#### **5.2.1.3 Operación y Desmantelamiento**

En estas fases del ciclo de la vida del SMR, no hay diferencias destacables frente a un reactor convencional de gran tamaño.

## 5.2.2 Calidad del suelo

La permeabilidad del suelo donde se construya es importante, ya que puede haber intercambio con contaminantes que son depositados en el suelo o que se liberan de los equipos o estructuras que componen la instalación de un SMR. Dichos contaminantes podrían llegar a fuentes de agua subterráneas o al propio suelo marino si se encontrase en el mar. El impacto en la calidad de la zona donde se cimenta dependerá del tipo de SMR construido y de las características del entorno.

### 5.2.2.1 Construcción

Para los diseños pensados para ser construidos bajo tierra se deberá crear un plan para el tratamiento de la tierra resultante de las excavaciones. Si es construido cerca de zonas costeras, probablemente será necesario drenar las zonas de excavación, dicha agua deberá ser retornada según un plan establecido. Todo ello ocurriría también en la construcción de un gran reactor, sin embargo, como sabemos el tamaño de las instalaciones SMR será menor por lo tanto la cantidad de material resultante a tratar será menor. Esto implicaría un impacto significativamente más reducido.

### 5.2.2.2 Operación y Desmantelamiento

Los SMR instalados en tierra y especialmente los localizados en el mar, tendrán un impacto menor comparado con los GGRR. Ya que se espera que los residuos emitidos al ambiente sean proporcionales a la instalación y por lo tanto menores en magnitud y efectos.

Respecto al desmantelamiento no hay grandes diferencias frente a GGRR, estén o no situados en tierra. La situación más destacable será si se decide en un SMR instalado en tierra reconstruir la zona que previamente había sido modificada para su instalación, respecto a movimientos de tierra. Lo cual evidentemente no afectará a un SMR instalado en el mar, aunque el desmantelamiento de muchas estructuras podrá hacerse en tierra.

## 5.2.3 Medio acuático

Una vez más y más aún en esta categoría el impacto dependerá del diseño del SMR en concreto, además de claro está de si se sitúa en el mar o en tierra.

### 5.2.3.1 Construcción

El tamaño de la instalación, el número de maquinaria necesaria, la duración de la construcción, la necesidad de drenajes o los trabajos realizados en el agua, son factores que determinan la magnitud del impacto en la calidad del agua. Desprendimientos, vertido de hidrocarburos, desperdicio de agua o residuos que generen turbidez en el agua, son consecuencias de las labores de construcción.

La necesidad de drenajes probablemente será mayor para los SMR diseñados para estar bajo tierra. Todas estas perturbaciones pueden alterar la corriente, la cantidad y la calidad de las fuentes subterráneas de agua. Las consecuencias evidentemente serán menores en este caso para instalaciones superficiales.

Para el caso de los SMR instalados en el mar, puede haber un incremento de los sólidos suspendidos o vertidos de hidrocarburos por la actividad de maquinaria bajo el agua, disminuyendo la calidad del medio y aumentando la turbidez.

### 5.2.3.2 Operación y Desmantelamiento

Las descargas del sistema de refrigeración y otras corrientes de desechos pueden ser un problema en potencia para las fuentes cercanas de agua. Estos problemas generados vendrán relacionados en función de la potencia producida en la instalación y de los desechos químicos y radiológicos liberados. Respecto a los SMR enterrados se deberá hacer un estudio muy detallado de su interacción con los depósitos y corrientes de agua subterráneas. Se deberá ver si el circuito de refrigeración es cerrado, es decir, dirigimos el agua de condensación hacia torres de refrigeración o a piscinas propias de la instalación de la instalación o si es abierto y desemboca, por ejemplo, a un río, ya que el máximo gradiente de temperatura que podremos crear será de 3°C (en España), con el fin de crear la menor perturbación posible en torno al medio y su vida.

En el aspecto del desmantelamiento, destacamos el caso de los SMR instalados en el mar, ya que las estructuras podrían no ser desmanteladas, consiguiendo así evitar una mayor perturbación del medio y de la calidad del agua.

## 5.2.4 Vida Marina

Aquí hablaremos del impacto en los seres vivos y su hábitat ya sea agua dulce o salada. Todo ello debido al empeoramiento de la calidad del agua o su reducción a causa de todos los procesos envueltos en el ciclo de vida del reactor.

### 5.2.4.1 Construcción

Para los SMR construidos en tierra el impacto vendrá determinado principalmente de la destrucción o alteración del hábitat y de forma indirecta o directa a través de las vibraciones y ruidos producidos. En las instalaciones en el agua, el impacto claramente será mayor. Todo ello debido al aumento de la actividad constructiva en el medio acuático. Un factor como la luz emitida que en tierra no era determinante, aquí si lo será.

### 5.2.4.2 Operación y Desmantelamiento

Destacamos en el caso de los SMR operados en el agua. Las turbinas del sistema de producción de potencia y su sonido y vibraciones puede resultar dañino para la fauna y su hábitat. Además, las estructuras construidas pueden alterar significativamente su hábitat, de forma, eso sí, negativa o positiva. Esto puede ser así porque puede destruir el hábitat donde se cimente la instalación o crear uno nuevo donde se desarrolle la vida directamente en la estructura. Su posible efecto positivo o negativo deberá ser estudiado para cada caso.

Si resultase en un efecto positivo se deberá tener en cuenta a la hora del desmantelamiento o no de esas estructuras en su totalidad.

## 5.2.5 Vida Terrestre

El impacto en este aspecto vendrá determinado por el empeoramiento de la calidad del aire, del suelo y del agua disponible, además de la alteración o destrucción del hábitat

### 5.2.5.1 Construcción

Los reactores que se instalen bajo tierra pueden tener un impacto directo en las fuentes de agua disponible y en su calidad, pudiendo privar de ella a un hábitat en concreto y suponer el fin de la vida allí, tanto vegetal como

animal. La excavación o las explosiones que pueden ser necesarias durante la fase de construcción pueden alterar en mayor o menor medida el hábitat y por lo tanto la calidad de vida de los seres vivos a su alrededor. El impacto sobre la fauna y vegetación en tierra será mucho menos para los SMR flotantes o instalados en el agua.

### 5.2.5.2 Operación y Desmantelamiento

En la operación y desmantelamiento de los SMR y su efecto sobre la biodiversidad en la zona no encontramos diferencias destacables con los GRR.

## 5.3 Impacto en la vida humana

Los riesgos físicos para los trabajadores serán distintos según la localización, ya que en las instalaciones en el agua existirá la posibilidad de ahogamientos y electrocución o caídas por contacto con superficies mojadas.

El impacto por emisión de elementos radiactivos o no-radiactivos será muy variable debido a la gran variedad de diseños que se manejan hoy en día de los SMR. Los cuales todavía no se han modelado debido a que muchos de ellos aún siguen en fase de diseño.

La calidad de vida en los seres humanos no solo viene determinada por la salud, hay otros factores que afectan a ella, como son: el impacto en el paisaje, la cultura, el tráfico o infraestructuras de transporte que se necesiten crear.

Así el lugar de construcción puede afectar al paisaje o a lugares destinados a la caza, pesca u ocio. Además de que el propio lugar tenga un significado sentimental o religioso para la población de la zona. Se espera que el impacto visual de la instalación y por lo tanto del cambio que genere en el paisaje sea significativamente menos que el de los GRR, llegando incluso a ser “despreciable” para los reactores instalados bajo tierra. Este impacto visual afectará a las actividades que se hubiesen llevado a cabo en la zona, además de poder modificar las actividades que se llevasen a cabo a su alrededor. Todo esto deja muy claro la importancia de un consenso con las poblaciones colindantes a la hora de licitar un terreno para la construcción de una instalación de estas características. Además, una comunicación fluida entre partes ayudará a las instituciones a realizar unos informes de impactos lo más precisos posibles teniendo en cuenta todos los puntos de vista.

El cambio o no del tráfico existente en la zona o de sus infraestructuras dependerá mucho de la propia localidad y de si existía una red de transporte previamente. En lugares donde ya existía el impacto en la vida cotidiana puede ser muy pequeño. Sin e en la construcción de instalaciones en lugares remotos, con casi toda seguridad necesitaremos la construcción de carreteras o vías de tren, lo que una vez más tendrá un impacto sobre el paisaje y la vida habitual en el entorno. La legislación en este caso dependerá del lugar donde se construya. Una buena red de transporte será necesaria, sobre todo para los SMR y una de sus características más importantes: su modularidad. Muchas de las partes de la instalación serán fabricadas en otros lugares, incluyendo el propio reactor, por lo que una buena comunicación entre zonas será necesaria para su correcta entrega. Aunque la zona disponga de una red de transporte lo más seguro es que necesite mejoras o acondicionamientos para este tipo de dispositivos, lo cual conllevará a una entrega más segura y a un menor impacto en las vidas de las personas. En los diseños de los SMR se tiene en cuenta estos factores y se pretende estandarizar su tamaño (diámetro de la vasija y peso) para facilitar su transporte por carreteras o trenes ya existentes y no tener la necesidad de utilizar unos específicos, lo cual evidentemente aumentaría costes y tendría un impacto negativo en el medio, por todo lo anteriormente expuesto.



Durante la operación de este es poco probable que se genere una diferencia de tráfico importante en la zona, debido a sus mayores largo periodos de recargas y a la necesidad de tener menos personal a cargo de la instalación.

Uno de los factores a destacar será el aspecto socioeconómico, definido por cosas como: empleos generados, ingresos y la mejora o no de los estándares de vida de la población de la zona.

Debido a la modularidad de los SMR, ya sean construidos en el mar o en la tierra, la necesidad de trabajadores probablemente sea menor y durante un periodo menor de tiempo respecto a los GRR. Aunque si las instalaciones son construidas y operadas en zonas aisladas, el impacto socioeconómico será sensiblemente mayor que los desarrollados en zonas con una mayor densidad de población. En las zonas aisladas se deberán construir y mantener infraestructuras como: puertos, carreteras, almacenes o centros médicos. Así el ingreso económico de los trabajadores de zonas aisladas será proporcionalmente mayor que en los trabajadores de zonas pobladas debido a mayores estándares de vida. Así la creación de estas instalaciones cree la necesidad de la construcción de más servicios a su alrededor como: comercios o restaurantes, aumentando así la riqueza generada. Esto tendrá un claro impacto en la salud de los trabajadores y su calidad de vida.

No solo deberemos tener los aspectos geológicos de la zona o su relación con las poblaciones cercanas, debemos tener especial atención si estamos proyectando cerca de otra nación, es decir, cerca de una o más fronteras. En las rutas de transporte puede ser necesario cruzar alguna frontera, especialmente para recarga de combustible en los SMR construidos en el mar. Es importante durante el desarrollo del proyecto identificar todos los posibles traslados que hagan necesario entrar en otro país, para evitar malentendidos y mantener una fluida comunicación e información de las mercancías y rutas entre los países involucrados.

## 5.4 Potencial impacto en un accidente

Con un accidente nos referimos tanto a liberación de residuos y elementos tanto radioactivos como no-radioactivos de forma involuntaria, que pueden conllevar cambios en el entorno.

El riesgo de un accidente lo definimos como el producto de la probabilidad que ocurra y sus consecuencias. Dichos factores se esperan que sean significativamente menores en los SMR frente a los GRR, debido a algunas de las características de su diseño, como las que vemos a continuación:

- Diferentes refrigerantes con una mayor capacidad de transferencia de calor; como por ejemplo los reactores de sales fundidas (IMSR-400), que pueden manejar mayores temperaturas que los GRR de agua pesada o ligera. Una forma efectiva de evitar la fusión del núcleo
- Características de los núcleos; algunos SMR se diseñan para que manejen de forma independiente la energía térmica producida durante un accidente o apagado del reactor. Esta característica puede ser usada para una vez más evitar la fundición del combustible.
- Combustibles más resistentes a fundirse; algunos diseños como un HTGR tiene un combustible con un punto de fusión sensiblemente mayor que las temperaturas alcanzadas en el interior del núcleo.
- Sumergidos bajo el agua; algunos diseños de SMR están diseñados para funcionar bajo el agua, con lo que en un posible accidente la liberación de material radiactivo a la atmósfera es mucho más reducido.

- Reactores contruidos en una pieza; algunos de los reactores refrigerados por agua incluyen todos los sistemas de suministro de vapor, dentro de la propia vasija a presión del reactor. Este tipo de diseño reduce en gran medida la probabilidad de quebrado en las tuberías o de liberación de refrigerante al exterior durante un accidente.
- Recargas; para este tipo de reactores por módulos, muchos diseños tienen prevista la retirada total del reactor una vez consumido el combustible y no únicamente el combustible, reduciendo así enormemente la probabilidad de un incidente en el manejo del combustible gastado o nuevo.
- Cogeneración; como hemos visto previamente en el documento estos reactores se plantean en muchas ocasiones como una fuente complementaria a una existente, como podría ser una turbina de gas. Si ocurriese algún evento en la turbina podría afectar al correcto funcionamiento del reactor y viceversa.
- Localización; la variabilidad de la localización de los SMR conlleva una gran variedad en las posibles consecuencias de un accidente. Es evidente que un complejo situado en el mar alejado de la costa o en tierra en una zona despoblada, podrá causar muchos menos daños que un reactor construido cerca de una zona con una gran densidad de habitantes.

# 6 CONCLUSIONES

---

La historia de los reactores modulares pequeños y su desarrollo comenzó muchas décadas atrás, lo que serían los primeros SMR los encontramos en los primeros submarinos nucleares, en torno a mediados de la década de los 50 del siglo pasado, sin embargo, esos reactores no eran rentables fuera de un contexto militar. En torno a los SMR hay más de 70 proyectos a lo largo del mundo y poco se parecen a aquellos primeros reactores pequeños, ya no solo son interesantes o viables en el aspecto militar sino también en el civil. Estos reactores tiene un gran atractivo y se está poniendo tanto interés internacionalmente porque suponen una aproximación distinta a la producción de energía a través de las reacciones de fisión; tienen potencias reducidas de hasta 300 MWe, son de menor tamaño que los reactores actuales, tendrán un gran carácter modular y su construcción será en serie en fábricas, situadas en lugares distintos a su destino final.

Todas estas características antes enunciadas tienen una serie de consecuencias para tener en cuenta, respecto a las potencias más reducidas que nos encontramos en los reactores, significará instalaciones más pequeñas y menos exigencias para el terreno donde se establezca, esto es de gran atractivo para zonas aisladas o de difícil acceso como los polos o archipiélagos. Este tamaño más reducido se espera también que incurra en el número de personal cualificado necesario, llegando en algunos de los proyectos a ser prácticamente nulo, con el consecuente ahorro en costes.

Otra de las características más importantes de estos reactores es que se diseñan para que sean modulares en mayor o menor grado, esto implica que se puedan construir en fábricas y ensamblarlos en el lugar de explotación o incluso ser transportados como una sola unidad, esto hace que los tiempos de construcción sean menores y por lo tanto su coste, que bajará aún más si la demanda es creciente.

Una de las ventajas para tener en cuenta es que en muchos diseños no es necesario manipular combustible gastado, es decir, una vez que el reactor llega al término de su vida útil y tras los procesos necesarios para su enfriamiento, se retira como una sola unidad. Dicho combustible es en muchos casos el mismo que se utiliza en reactores actuales, con pequeñas modificaciones en el tamaño o el recubrimiento, en otros diseños se pretende implementar combustibles distintos nunca antes utilizados, lo que supone un hándicap para estos reactores, ya que necesario diseñar el ciclo de combustible al completo, no solo su producción, sino extracción, desarrollo y deposición final, lo que supone una mayor inversión, además de asegurar un sistema que impida la proliferación para un uso militar de los productos nucleares. Recordemos que con los SMR se pretende establecer un mercado mundial, por lo que esos reactores acabarían en manos de muchos países distintos, por lo que se debe asegurar que con la tecnología implementada en los reactores y su combustible no se pueda hacer un uso militar.

Respecto a esto nos encontramos otro de los grandes inconvenientes, para que este sistema comercial tenga éxito debe haber primero, pocos modelos disponibles en el mercado que cubran la demanda, ya que son proyectos con un gran coste y para cada uno de ellos se debe crear toda una industria para su desarrollo, construcción, mantenimiento y desmantelamiento, por lo que para que estos sean rentables la demanda debe estar concentrada en unos pocos modelos. Lo que debe estar claro es que un proyecto por muy prometedor o innovador que sea, no llegará a una fase comercial sino demuestra que puede generar beneficio económico, esta es probablemente la máxima en cualquier desarrollo de un producto o tecnología y así es en los SMR. Este objetivo se espera que lo cumplan gracias a la serie de características que se pretenden implantar alrededor de la industria que genere los SMR y que se han enumerado previamente como son la modularidad, fabricación en serie o una legislación común.

Es precisamente en la legislación donde probablemente encontremos unos de los inconvenientes más importantes a superar en torno a estos reactores. El mercado para cada SMR se pretende, como es evidente, que sea lo más internacional posible y una de las barreras para que esto ocurra, la más importante, es la legislación. Conseguir que un proyecto en torno a un reactor nuclear consiga todos los permisos para su construcción, es un proceso largo y costoso, esto si se hace solo en un país, lo cual es lo habitual, sin embargo, unos de las metas es conseguir una legislación unificada a muchos países, es decir, facilitar la comercialización de los SMR a lo largo del mundo independientemente de su país de desarrollo o fabricación. Un ejemplo de esto lo encontramos con el reactor ISMR – 400 el cual está siendo licitado conjuntamente por EE. UU. y Canadá con el objetivo de ser comercializado en primera instancia en ambos países de forma simultánea, ahorrando así en costes y tiempo, además de claro está de aumentar el mercado disponible y por lo tanto los beneficios en potencia.

Debemos dejar claro que el mercado y la industria en torno a los SMR aún está en sus primeros pasos y los posibles usos o destinos que tengan pueden intuirse o pretender que sean los que se han explicado durante el documento, pero pueden cambiar en gran medida ya que al final estos reactores están relegados a la voluntad de las empresas tanto públicas como privadas a invertir en ellos. Independientemente del desarrollo de otras tecnologías hace parecer que los SMR tendrán un hueco en los mixes eléctricos de muchos países, para desarrollar redes híbridas junto a las fuentes de energía renovables y suplir sus carencias, además así conseguir reducir el consumo de combustibles fósiles y así reducir la producción de CO<sub>2</sub>. Otro de los destinos de los SMR será proporcionar de una energía limpia y segura a zonas aisladas o con una necesidad de potencia reducida, así como sustituir fuentes de energía no renovables como centrales térmica de carbón o gas o motores de combustión interna alternativos de diésel (una forma de producción de potencia habitual en las islas).

Desde una perspectiva más personal, el desarrollo de los SMR al nivel más optimista estimado por parte de las organizaciones y empresas internacionales, es algo poco probable, es decir, la barrera no se sitúa en la propia construcción individual de los SMR, la dificultad está en la industria que se pretende construir a su alrededor y la enorme inversión que sería necesaria, porque recordemos que uno de los aspectos que hace reducir el coste de los SMR y en general de cualquier producto, es tener una gran producción, realizar más unidades baja el coste, es evidente que las primeras unidades no se pueden beneficiar de esto y tendrán costes similares a los reactores actuales. Además de los grandes esfuerzos que hay que llevar a cabo a nivel legislativo y en torno a la seguridad, que hacen que la posibilidad de la existencia de un mercado global sea más complicada. A lo largo de las próximas décadas se seguirán desarrollando, pero está por ver el alcancen que tendrán y si se quedarán relegados a los países que ya tiene un programa nuclear, ya que recordemos que unos de los atractivos de los SMR es introducir la energía nuclear en países que no tiene actualmente un programa. Sin embargo, si se consigue crear el mercado global que se ha planteado y si los diseños existente no se atascan o retrasan, probablemente los SMR supongan un punto de inflexión para los países y sus mixes eléctricos y la descarbonización, además de introducir esta energía limpia y segura en países sin plan nuclear o con una red poco fiable y con deficiencias, lo que puede suponer un punto de inflexión en países en desarrollo.

# ANEXOS

## ANEXO I

Tabla resumen del Micro Modular Reactor (MMR)

PARÁMETRO	VALOR
Empresa desarrolladora	USNC, EE. UU.
Tipo de reactor	MMR – Refrigerado por gas a alta temperatura (HTGR)
Refrigerante/Moderador	Helio/Grafito
Potencia térmica/eléctrica	15 MWt/5MWe
Circulación primaria	Circulación forzada
Presión primario/secundario	3 MPa (Helio)/ 0,5 MPa (Sales solares)
Temperatura entrada/salida núcleo	300/630 °C (Helio - Primario) 275/565 °C (Sales solares - Secundario)
Tipo de combustible	TRISO (UO <sub>2</sub> )
Número de barras de combustible	180 (172.800 pellets)
Enriquecimiento	19,75 %
BurnUp	82.227 MWd/kg
Periodo de recarga	Nunca
Control de reactividad	Barras de Control Coeficiente de temperatura negativo
Vida útil	20 años
Tamaño de la planta	130 x 96 m
Tamaño reactor (altura/diámetro)	13,25 m/ 3,5 m
Estado de diseño	En proceso de licenciarse

## ANEXO II

Tabla resumen del NuScale Reactor (PWR)

PARÁMETRO	VALOR
Empresa desarrolladora	NuScale Power Inc.
Tipo de reactor	SMR – Reactor de agua a presión (PWR)
Refrigerante/Moderador	Agua/ Agua
Ciclo termodinámico	Rankine
Circulación Primaria	Natural
Vida útil	60 años
Factor de capacidad	>95%
Potencia térmica/eléctrica	200MWt/ 60 MWe
Tamaño de la planta	4877 m <sup>2</sup>
Presión de los circuitos primario/secundario	13,8 MPa/4,4 MPa
Masa de refrigerante primario	4,67 x 10 <sup>4</sup> kg
Caudal refrigerante primario/secundario	666 / 87 kg/s

<b>Temperatura entrada/salida del núcleo</b>	265/321 °C
<b>Material de la vasija del reactor</b>	SA - 508
<b>Diseño del generador de vapor</b>	Helicoidal
<b>Masa de refrigerante secundario</b>	2,54 x 10 <sup>4</sup> kg
<b>Capacidad para combustible gastado</b>	18 años/ 4500 m <sup>3</sup>
<b>Ciclo de recarga</b>	24 meses
<b>Combustible</b>	UO <sub>2</sub>
<b>Enriquecimiento</b>	<4,95 %
<b>Recubrimiento del combustible</b>	Framatome M5
<b>Peso de una barra de combustible</b>	250 kg
<b>BurnUp</b>	>30 MWd/kg
<b>Control de reactividad</b>	Barras de control Boro disuelto
<b>Material de las barras de control</b>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Estado de desarrollo</b>	Últimos pasos previos a la construcción

## ANEXO III

Tabla resumen IMSR – 400

PARÁMETRO	VALOR
<b>Empresa desarrolladora</b>	Terrestrial Energy (Canadá)
<b>Tipo de reactor</b>	Molten Salt Reactor (MSR)
<b>Potencia térmica/eléctrica</b>	400 MWt/185 MWe
<b>Eficiencia</b>	46-48 %
<b>Vida útil</b>	60 años
<b>Factor de capacidad</b>	90 %
<b>Combustible/Refrigerante primario</b>	Sales fundidas con UF <sub>4</sub>
<b>Enriquecimiento</b>	2 – 5 %
<b>Refrigerante secundario</b>	Sales fundidas (sin combustible)
<b>Moderador</b>	Grafito
<b>Ciclo termodinámico</b>	Rankine
<b>Caudal de vapor sobrecalentado</b>	148,5 kg/s
<b>Temperatura/presión del vapor</b>	585 °C/ 19 MPa
<b>Temperatura de agua de alimentación</b>	240 - 280 °C
<b>Caudal de refrigerante primario</b>	5400 kg/s
<b>Presión en el reactor</b>	0,4 MPa (hidrostática)
<b>Temperatura entrada/salida del núcleo</b>	625/ 700 °C
<b>Altura/diámetro del reactor</b>	4/ 3,4 m
<b>Ciclo del combustible</b>	Nunca – 84 meses
<b>BurnUp</b>	29 MWd/kg
<b>Material barras de control</b>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Peso de la vasija del reactor</b>	170 t
<b>Presión/temperatura de diseño de la vasija</b>	0,5 MPa / 700 °C
<b>Tipo generadores de vapor</b>	Carcasa y tubo
<b>Estado de desarrollo</b>	Licenciándose en EE. UU y Canadá conjuntamente

# REFERENCIAS

1. Fernández, Alfredo García. *La energía nuclear salvará el mundo: Derribando mitos sobre la energía nuclear*. Madrid : Planeta, 2022.
2. *La Primera Pila Atómica*. Corbin Allardice, Edward R. Trapnell. 1946.
3. Laboratorio Nacional de Oak Ridge. *Metals and Ceramic Division History 1946-1996*. 1999. ORNL/M-6589.
4. Key Dates. *Key Dates of Events at the Hanford Site 1943-1990*.
5. Foro Nuclear. Foro Nuclear. [En línea] 7 de Mayo de 2013. [Citado el: 22 de Junio de 2022.] <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/cuales-son-los-nuevos-reactores-del-futuro/>.
6. IAEA. *Situación y Perspectivas Internacionales de la Energía Nucleoeléctrica*. Viena : IAEA, 2021. GOV/INF/2021/32-GC(65)/INF/6.
7. —. Power Reactor Information System. *PRIS*. [En línea] [Citado el: 21 de Junio de 2022.] <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=DE>.
8. —. Power Reactor Information System. *PRIS*. [En línea] [Citado el: 22 de Junio de 2022.] <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>.
9. —. Power Reactor Information System. *PRIS*. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2022.] <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>.
10. —. Power Reactor System Information. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2022.] <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SI>.
11. Foro Nuclear. FORO Nuclear- Energía España. [En línea] [Citado el: 29 de julio de 2022.] <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/energia-nuclear-en-espana/>.
12. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. [En línea] 2022. [Citado el: 2 de agosto de 2022.] <https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>.
13. Nuclear Energy Agency. *Small Modular Reactor: Challenges and Opportunities*. 2021. 7560.
14. International Atomic Energy Agency. *Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment*. Austria : IAEA, 2021. 978-92-0-110121-1.
15. Nuclear Power. Nuclear Power - Burn up. [En línea] [Citado el: 14 de Agosto de 2022.] <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/reactor-operation/fuel-burnup/>.
16. HTR-PM. *High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module*. 2011.
17. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 28 de agosto de 2022.] <https://en.wikipedia.org/wiki/HTR-PM>.
18. Ultra Safe Energy. Ultra Safe Energy - Presentación. [En línea] [Citado el: 15 de julio de 2022.] [https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2019-09/3-4\\_usnc\\_mmr.pdf](https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2019-09/3-4_usnc_mmr.pdf).

19. USNC. USNC-FUEL. [En línea] [Citado el: 19 de julio de 2022.] <https://usnc.com/fcm-fuel/>.
20. —. *USNC Micro Modular Reactor (MMR Block I)*. 2021.
21. Consejo de Seguridad Nuclear. CSN - Almacenamiento geológico profundo. [En línea] [Citado el: 15 de agosto de 2022.] <https://www.csn.es/almacenamiento-geologico-profundo>.
22. United States Nuclear Regulatory Commission. US Nuclear Regulatory Commission - Seismic Category. [En línea] 9 de Marzo de 2021. [Citado el: 28 de Junio de 2022.] <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/seismic-category-i.html>.
23. NuScale Power, LLC. *NuScale SMR (NuScale Power, LLC)*. 2020.
24. NuScale Power INC. NuScale Plant Design Overview. [En línea] 2012. [Citado el: 9 de septiembre de 2022.] <https://www.nrc.gov/docs/ML1221/ML12216A392.pdf>.
25. NuScale Power Inc. *NuScale Power, LLC Submittal of "NuFuel-HTP2™ Fuel and Control Rod Assembly"*. 2019.
26. Framatome. *M5 Advanced Cladding*. 2018. PS\_US\_037\_ENG\_05\_18.
27. Oak Ridge National Laboratory. *Status Report - SmAHTR*. 2016.
28. Terrestrial Energy. Terrestrial Energy - Timeline. [En línea] [Citado el: 18 de agosto de 2022.] <https://www.terrestrialenergy.com/technology/leading-the-way/>.
29. —. *Status Report - IMSR-400*. 2016.
30. J. Choe, M. Ivanova, D. LeBlanc, S. Mohaptra, R. Robinson. *FUEL CYCLE FLEXIBILITY OF TERRESTRIAL ENERGY'S INTEGRAL MOLTEN SALT REACTOR*. 2018.
31. Dr. Ross Peel, George Foster, Sukesh Aghara. *Nuclear Security and Safeguards Considerations for Novell Advanced Reactor*. London : King's College London, 2022.
32. Duguay, Raphael. *Small Modular Reactors and Advanced Reactor Security: Regulatory Perspectives on Integrating Physical and Cyber Security by Design to Protect Against Malicious Acts and Evolving Threats*. Tennessee : s.n., 2020.
33. Nuclear Energy Agency. *Small Modular Reactor*. Austria : Organisation for economics co-operation and development, 2021. 7560.
34. IAEA. *Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities*. Austria : IAEA, 2018. 978-92-0-102518-0.
35. International Atomic Energy Agency. *Consideration for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors*. Viena : IAEA, 2020. 978-92-0-108420-0.
36. International Atomic Energy Agency. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Viena : IAEA, 2020.
37. IAEA. Power Reactor System Information. [En línea] [Citado el: 21 de Junio de 2022.] <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CN>.



- 
38. —. Organismo Internacional de la Energía Atómica. [En línea] [Citado el: 23 de Junio de 2022.] <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/el-uso-de-la-energia-nucleoelectrica-mas-alla-de-la-generacion-de-electricidad-las-aplicaciones-no-electricas>.
39. ITER. International Thermonuclear Experimental Reactor. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2022.] <https://www.iter.org/construction/TokamakAssembly>.
40. IAEA. *Advanced in Small Modular Reactor Technology Developments*. Viena : s.n., 2020.
41. NuScale Power Inc. *NuScale Power Inc - Fuel and Security Roads*. s.l. : NuScale, 2019.
42. Ultra Safe Energy. Ultra Safe Energy . [En línea] [Citado el: 15 de julio de 2022.] <https://usnc.com/mmr-energy-system/>.
43. GIF. Sodium-Cooled Fast REactor. [En línea] [Citado el: 3 de agosto de 2022.] [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_42152/sodium-cooled-fast-reactor-sfr](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42152/sodium-cooled-fast-reactor-sfr).





