

# Pequeños reactores modulares: el futuro de la energía nuclear

## *Small Modular Reactors: The Future of Nuclear Energy*

Luis Felipe Durán Vinuesa<sup>1\*</sup>, Samantha Larriba Del Apio<sup>2</sup>, Antonio Jiménez Carrascosa<sup>3</sup>

### Resumen

Los pequeños reactores modulares son reactores nucleares capaces de producir hasta 300 MW de potencia eléctrica. El interés en esta tecnología ha aumentado de forma significativa con el objetivo de afrontar los retos que plantea el paradigma energético, tecnológico y económico actual. Diferentes agentes ponen en el punto de mira las características de la energía nuclear para complementar un *mix* eléctrico con alta penetración renovable, mientras que la industria nuclear vela por su viabilidad económica en un entorno en el que las energías renovables son cada vez más competitivas, además de mejorar aspectos relacionados con la seguridad. Estos reactores parecen ser la respuesta a este cambio de paradigma: por su pequeño tamaño, pueden adaptarse a las infraestructuras eléctricas más modestas, pudiendo ser transportados y utilizados para suplir necesidades estacionales. Desde el punto de vista de la seguridad, integran sistemas pasivos que reducen el número de componentes, así como el coste de inversión inicial, mejorando la fiabilidad de la planta ante un evento tipo Fukushima. Su construcción modular reduce los tiempos de construcción, así como los costes de construcción, y sus nuevas aplicaciones, el coste de la energía producida. Estas mejoras atraerían la inversión de capital para acelerar el reto de la descarbonización. En este artículo se proporciona una visión integral de los factores que han suscitado el interés en estos nuevos diseños, haciendo un recorrido por sus aspectos económicos y características técnicas, así como por sus diversas aplicaciones y los desarrollos que son esperables en el medio plazo.

**Palabras clave:** energía, reactor nuclear, modular, tecnología, diseño, seguridad.

### Abstract

*Small modular reactors are nuclear reactors capable of producing up to 300 MW of electrical power. The ongoing energy transition poses many challenges and the agents involved in the next years' energy policies are focused on the characteristics of nuclear energy, such as its ability to adapt to energy systems with a large renewable component and its economic viability. On the other hand, the nuclear industry puts its efforts to face the future economic paradigm characterized by lower energy prices based on the foreseen energy costs, while improving the response of the nuclear power plant to adverse conditions. Small modular reactors are a scalable technology highly adaptative to poorly developed infrastructures. Some designs can even be transported to provide seasonal energy supply. From the nuclear safety perspective, these reactors rely on passive systems to avoid or mitigate accidental scenarios such as the Fukushima nuclear accident in 2011, also reducing the reactor cost. Modular designs that reduce the reactor's building time also reduce overnight costs, and their new applications can increase the utilization of the energy resource. These design improvements are attracting potential investors, boosting the energy transition to a low-carbon electricity mix. This article provides an overall picture of the reasons leading to the increasing interest in these new designs and their technical features, going from economic and technical aspects to their applications and development in the midterm.*

**Keywords:** Energy, nuclear reactor, modular, technology, design, safety.

## 1. CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL

En la actualidad, la energía nuclear enfrenta un gran reto al postularse en muchos países como una opción rápida y eficaz para disminuir sus niveles de emisiones de gases de efecto invernadero en un escenario energético cambiante que durante los últimos meses nos ha dejado

entrever más de sus debilidades que de sus muchas fortalezas. El escenario energético actual está caracterizado por una situación coyuntural motivada por el encarecimiento del precio del gas antes de la invasión a Ucrania, que produjo el 25 % de la energía en Europa durante el pasado año 2020 (BP, 2021), por el aumento del precio de los derechos de emisiones de CO<sub>2</sub>, que en tan solo un año han aumentado un 80 % de media, desde los 24,75 a los 44,92 €/tCO<sub>2</sub> como puede consultarse en SENDECO2 (SENDECO2, 2021), el sistema europeo de negociación de CO<sub>2</sub>. También ha influido el histórico climatológico de temporales alrededor del planeta o el brusco aumento de la demanda energética resultado de la recuperación económica global durante 2021, al margen de otros hechos puntuales que han podido influir en la capacidad de abastecimiento de los grandes suministradores como los accidentes industriales, y hasta cuestiones relacionadas con la geopolítica como la invasión ucraniana o las tensiones con Argelia, que han dado la vuelta al abastecimiento de gas, el cual,

\* Autor de contacto: [luisfelipe.duran@upm.es](mailto:luisfelipe.duran@upm.es)

<sup>1</sup> Ingeniero de la energía e investigador predoctoral. ETS de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Jóvenes Nucleares (Sociedad Nuclear Española).

<sup>2</sup> Ingeniera de la energía e investigador predoctoral. ETS de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Jóvenes Nucleares (Sociedad Nuclear Española).

<sup>3</sup> Ingeniero de la energía e investigador predoctoral. ETS de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Jóvenes Nucleares (Sociedad Nuclear Española).

actualmente se importa hasta en un 60 % por buques metaneros. Son muchos los factores que han puesto de manifiesto las debilidades de la dependencia energética del gas y la necesidad de llevar a cabo una reforma en el mercado eléctrico, poniendo sobre la mesa otras cuestiones como la formación del precio de la tarifa regulada o PVPC (Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor). En definitiva, el efecto combinado de todas estas circunstancias ha sido un aumento del precio de la electricidad del 98 % entre diciembre de 2020 y junio de 2021 según las estimaciones del Banco de España (Pacce *et al.*, 2021), al que todavía habrá que sumar los efectos colaterales del conflicto ucraniano y las respuestas del Gobierno durante los últimos 6 meses.

Otra piedra angular del paradigma energético es el grupo de científicos que analiza las posibles causas y efectos del calentamiento global, el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), que cuenta con 195 estados miembros y que extrae el consenso científico de un grupo de casi 2.900 expertos de 105 países diferentes. Añadiendo más tensión a la situación actual, el pasado mes de agosto se hizo público el informe de la sexta evaluación del grupo de trabajo I (Masson-Delmotte *et al.*, 2021), que comienza con la frase “Es un hecho unívoco que la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra”. En lo fundamental, el informe establece la necesidad de reducir las emisiones CO<sub>2</sub> antrópicas en torno a un 45 % para 2030, tomando como referencia la tasa de emisiones en 2010, para poder alcanzar la neutralidad de emisiones de CO<sub>2</sub> en 2050, y evitando así un aumento de la temperatura media del planeta y de olas de calor extremo. Otros pronósticos con un nivel de confianza medio son los que se refieren a inundaciones y a sequías en algunas regiones habitadas del planeta.

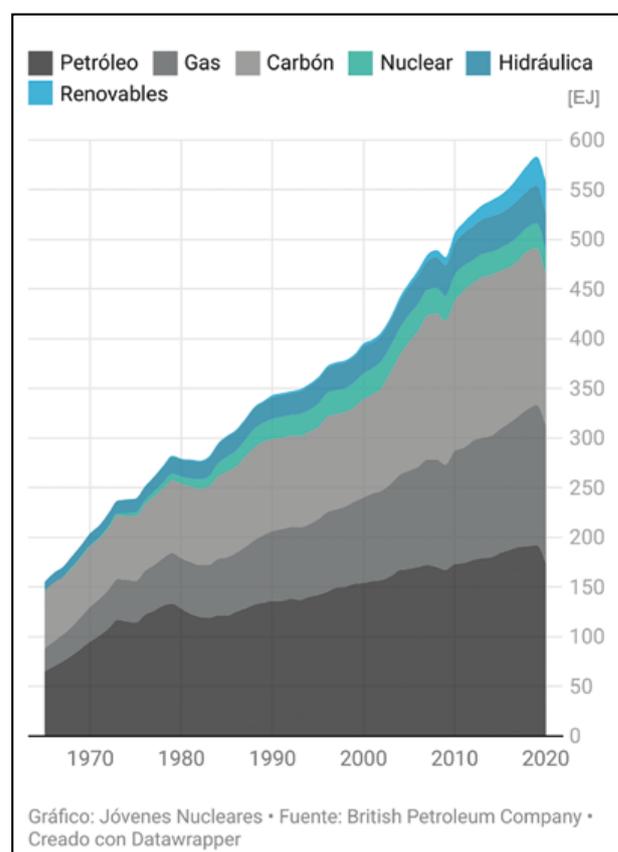
En definitiva, se trata de reducir los riesgos que supone la modificación de los ecosistemas y la dinámica del planeta, como la circulación termohalina del Atlántico Norte, responsable de atemperar los climas en el norte de Europa y que actúa como uno de los sumideros más importantes de CO<sub>2</sub> de la Tierra. Estas dinámicas podrían verse alteradas, causando un impacto en las condiciones climáticas que modificarían los hábitats terrestres, de no limitar el aumento de la temperatura media del planeta a 1,5 °C para 2050 respecto a niveles preindustriales (Masson-Delmotte *et al.*, 2018). Hasta ahora, ha habido un aumento de 1 °C respecto al nivel referenciado.

Para terminar de contextualizar el escenario donde nos encontramos, tras resumir brevemente el contexto del mercado energético y su impacto en Europa e introducir la motivación de la necesaria transición energética en la que estamos inmersos, es necesario conectar ambos bloques. La conferencia de la Organización de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) que tuvo lugar el pasado mes de noviembre puso de manifiesto los esfuerzos de la comunidad internacional, que traslada los objetivos en materia de reducción de emisiones y electrificación del transporte, alineados con las conclusiones de los informes del IPCC, a las líneas políticas de acción conjunta de todos los países y que también están ligados a los ya conocidos Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Los principales logros de la COP26 fueron varios, entre ellos la creación de un programa de trabajo para definir el objetivo global de adaptación a los impactos climáticos

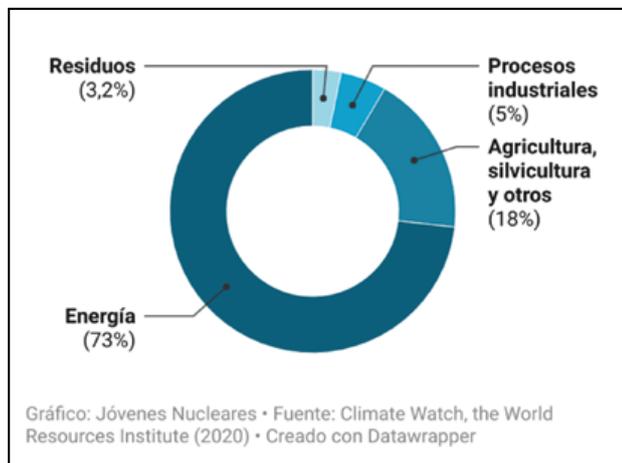
que ya ocurren en varias regiones del planeta y abordar el apoyo económico a los países en desarrollo en esta materia, ya que son los más vulnerables, o el compromiso de los países más contaminantes de reducir de forma gradual el uso del carbón, que supone hoy en día el 27 % de la energía primaria a nivel mundial. También se han finalizado las directrices para la aplicación del Acuerdo de París de 2015 con un compromiso para garantizar la igualdad de condiciones en el mercado de CO<sub>2</sub>, y han concluido las negociaciones en materia de transparencia para establecer un entorno de confianza que promueva la cooperación internacional. Mediante acuerdos, los diferentes gobiernos trabajan en paquetes de medidas enfocados a perseguir los objetivos marcados por la comunidad internacional. Así, por ejemplo, Europa desarrolla su nueva taxonomía verde para promover, haciendo más atractiva su financiación, aquellas fuentes energéticas que, bajo el criterio de los expertos y el consenso político, se consideran valiosas en – la transición hacia – ese nuevo horizonte energético, y España tiene su Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) (MITERD, 2021), publicado en el «BOE» núm. 77, de 31 de marzo de 2021, que persigue la neutralidad en emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2030. Los diferentes países tienen diversos intereses y herramientas de las que disponer para enfrentar la fuerte reducción de emisiones que debe ocurrir durante las próximas décadas. Es aquí donde entra en juego la energía nuclear.

Son varios los países con un alto grado de dependencia de las energías fósiles, mayoritariamente petróleo, carbón y gas natural. Como se puede ver en el gráfico de la figura 1, el mundo aún depende en gran medida de estos combustibles, si bien, los países más desarrollados han podido

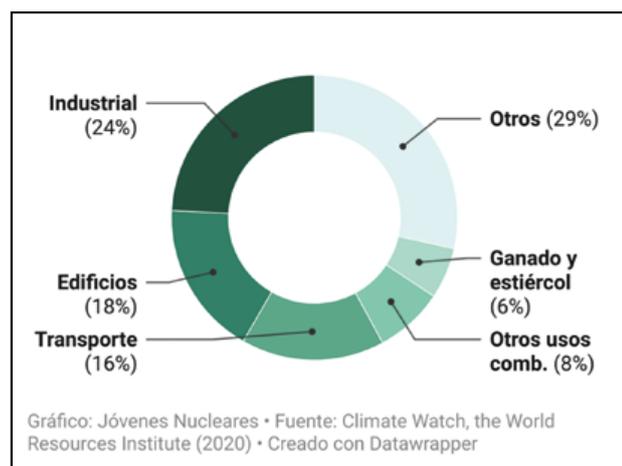


**Figura 1.** Consumo mundial de energía primaria en el periodo 1965 – 2020 (BP, 2021).

reducir esta dependencia. En línea con los objetivos que marcan las organizaciones internacionales, es necesario aplicar políticas energéticas de descarbonización que deben tener un efecto rápido y, por tanto, deben impactar en los sectores más emisores, que actualmente son la producción de electricidad y calor, y el transporte (Ritchie y Roser, 2020), como se puede apreciar en las figuras 2 y 3.



**Figura 2.** Origen de las emisiones globales agrupadas por sector (Ritchie y Roser, 2020).



**Figura 3.** Emisiones asociadas al uso de energía desglosadas por subsectores (Ritchie y Roser, 2020).

Estas medidas pasan por la electrificación del transporte, la cual tendría un impacto positivo también en la contaminación local de las grandes ciudades, o ciudades que por su situación orográfica pueden llegar a retener la contaminación local (*smog* fotoquímico). También son importantes las medidas en materia de eficiencia energética, que contrarrestarían parcialmente el aumento de la demanda energética prevista ralentizando el crecimiento de la tasa de emisiones. Pero, sin duda, todas estas medidas pierden fuerza o carecen de sentido (en el caso de la electrificación del transporte) si no van acompañadas de un cambio en los parques de generación eléctrica.

Es por ello por lo que los países desarrollados centran sus esfuerzos en descarbonizar el sistema eléctrico, y aquéllos en vías de desarrollo en configurar sus parques para desarrollarse minimizando su huella de carbono. Estos sistemas de producción energética del futuro estarían basados en fuentes de bajas emisiones como las energías

renovables, la energía nuclear o la energía hidráulica, que se sitúan en el podio de las energías con menores emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía producida. En el caso concreto de la energía nuclear, esta compete en otros indicadores que miden el impacto que tiene la generación energética en el ecosistema, como el consumo intensivo de materiales o el uso intensivo de suelo que, en este contexto, han perdido importancia relativa. Para trasladar estos proyectos a la realidad, es una condición *sine qua non* el análisis económico de cada fuente, materia en la que actualmente se centran los esfuerzos de las grandes empresas y los centros de investigación, que tienen por objetivo aumentar la competitividad económica de la energía nuclear mediante la conocida como *Long Term Operation (LTO)*, o las nuevas tecnologías de reactores modulares pequeños o *Small Modular Reactors (SMR)*, por sus siglas en inglés.

## 2. CONTEXTO DE LA ENERGÍA NUCLEAR

En 2011 tuvo lugar el accidente de Fukushima, que tuvo un impacto negativo en la generación nuclear en Europa, ya que Alemania tomó la decisión de cerrar de manera progresiva sus reactores nucleares, que suministraban el 22,4 % de su demanda eléctrica, con el objetivo de desnuclearizar su producción para finales de 2022. Su política de transición energética, la *Energywende*, prevé el fin de la generación con carbón en el año 2030. Ese mismo año se cerraron 8 reactores de los 17 que operaban entonces, y actualmente solo 6 permanecen en operación. En 2011 Suiza también se sumó a esta desnuclearización y en 2017 realizó un referéndum sobre su nueva política energética. Entonces, el 35 % de la demanda de electricidad era cubierta con energía nuclear y desde ese mismo año ha cerrado uno de los cinco reactores que tenía en operación, aunque el cierre de los cuatro restantes aún no tiene una fecha definitiva. Esta tendencia configura un escenario en el que Europa ha sido el único continente en disminuir su producción nuclear, mientras que, en el resto del mundo, el tamaño del parque permanece constante o en crecimiento, con mención especial a China.

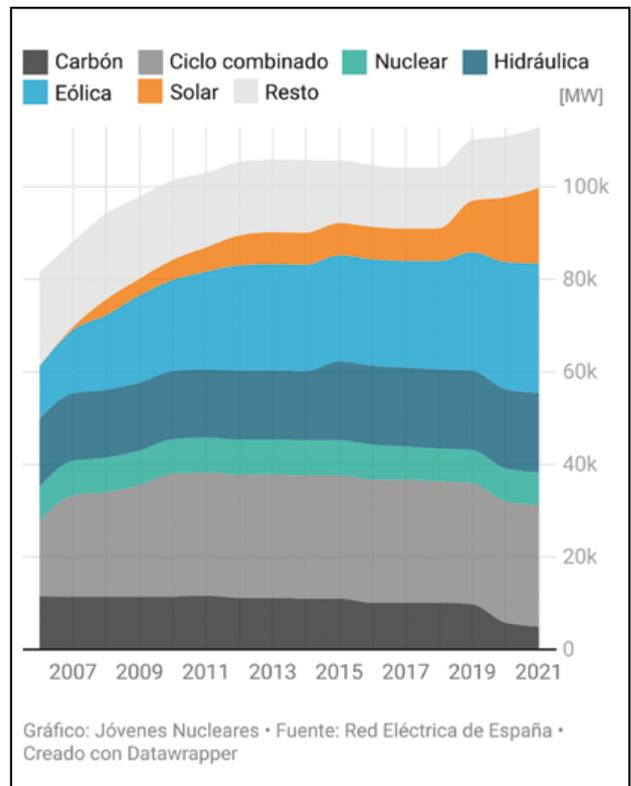
El gigante asiático, que solo en la última década ha conectado 37 reactores nucleares a la red (más del 70 % de su parque nuclear), cuenta con 18 reactores en construcción, habiendo anunciado, en el último trimestre de 2021, un ambicioso plan de construcción nuclear de 150 reactores nucleares a construir en 10 años para reducir el peso del carbón como fuente de energía, desde un 52 % actual hasta un 3 % en 2060. Otro caso digno de mención es el de Japón, que para 2011 generaba el 30 % de su electricidad con energía nuclear, y que tras el accidente de Fukushima apagó todos sus reactores nucleares. En la actualidad ha fijado un objetivo del 20 % de producción nuclear para 2030 para poder cumplir con sus objetivos climáticos y reducir su dependencia de los combustibles fósiles.

España recoge en el anteriormente mencionado PNIEC (MITERD, 2021) su estrategia energética, en el que figura un calendario de cierre del parque nuclear que culminaría en 2035. Este plan de cierre es el resultado de un acuerdo con ENRESA, la empresa nacional encargada del desmantelamiento de las instalaciones nucleares y de la gestión de los residuos radiactivos, y con las empresas propietarias de las centrales nucleares. Este plan de cierre tendría lugar

de forma progresiva, a la par que se produce un aumento de la penetración de las energías renovables en el *mix* eléctrico español. Durante la transición a un sistema eléctrico descarbonizado, se prevé contar con el respaldo de los ciclos combinados de gas que fueron impulsados durante la década de los 2000 y que reducen las emisiones respecto a la generación eléctrica basada en el carbón. En esta misma época, y de forma simultánea a la instalación de los ciclos combinados, se produjo el cese de actividad de las centrales nucleares de José Cabrera (2006) y de Santa María de Garoña (2011), aunque también tuvo lugar la repotenciación del parque nuclear español para aumentar la potencia nuclear instalada en 810 MW eléctricos (MWe), un poco menos de lo que hubiera supuesto la construcción de un nuevo reactor (*Plans for New Nuclear Reactors Worldwide*, 2021). La evolución de la potencia instalada y del abastecimiento de la demanda eléctrica desde el año 2007 se muestra en las figuras 4 y 5, respectivamente.

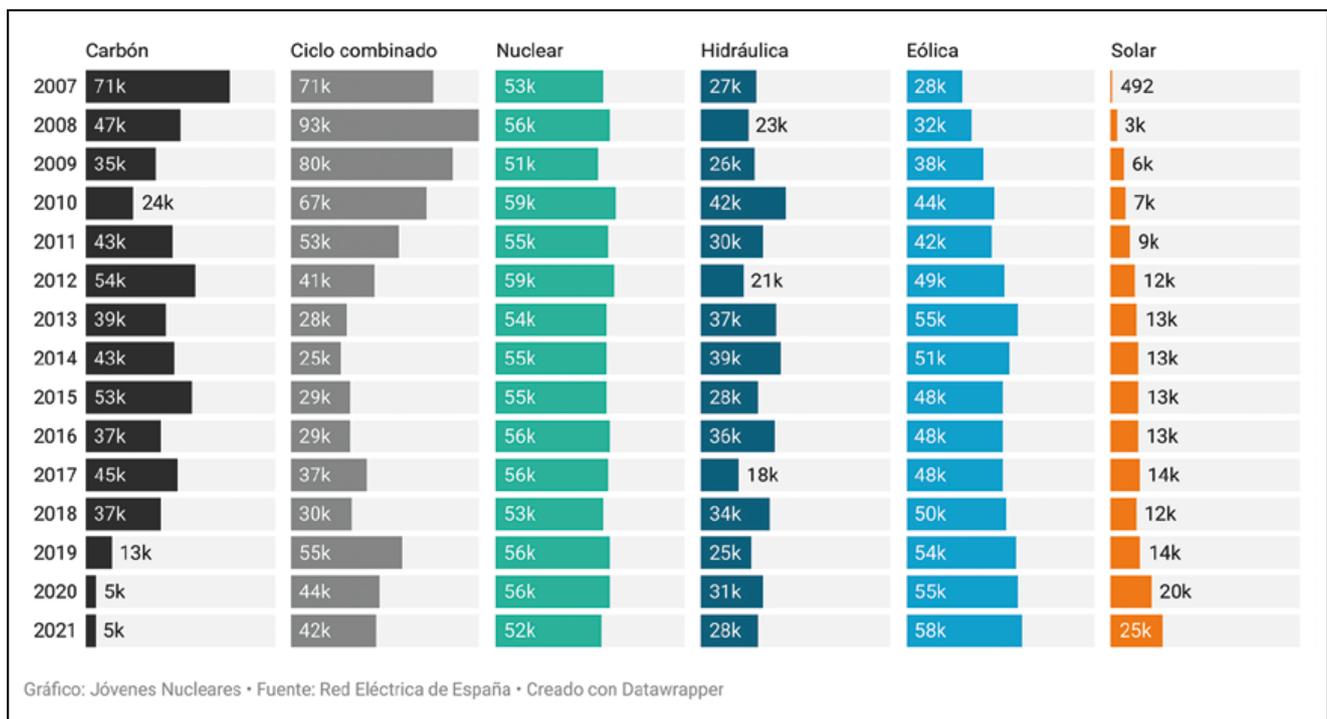
Actualmente, hay 445 reactores nucleares en operación repartidos en 32 países y 19 reactores nucleares en construcción, según la *World Nuclear Association (WNA)*. Bangladesh, Bielorrusia, Egipto, Turquía y Emiratos Árabes Unidos se encuentran entre los denominados *newcomers*, países que están implementando un programa nuclear para producir energía, mientras que otros países que actualmente no disponen de generación nuclear, como Kenia, Ghana, Filipinas y Uzbekistán, están considerando formalmente entrar en el grupo de países nucleares, según Rafael Mariano Grossi, director general de la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA), de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). En el mapa de la figura 6 se muestra el estado de implantación de tecnología nuclear para generar electricidad a nivel mundial.

Con el aumento de penetración de las energías renovables en el *mix* eléctrico, el entorno económico en el que se encuentra la energía nuclear ha cambiado significativamente, ya que las tecnologías con las que debe equipararse

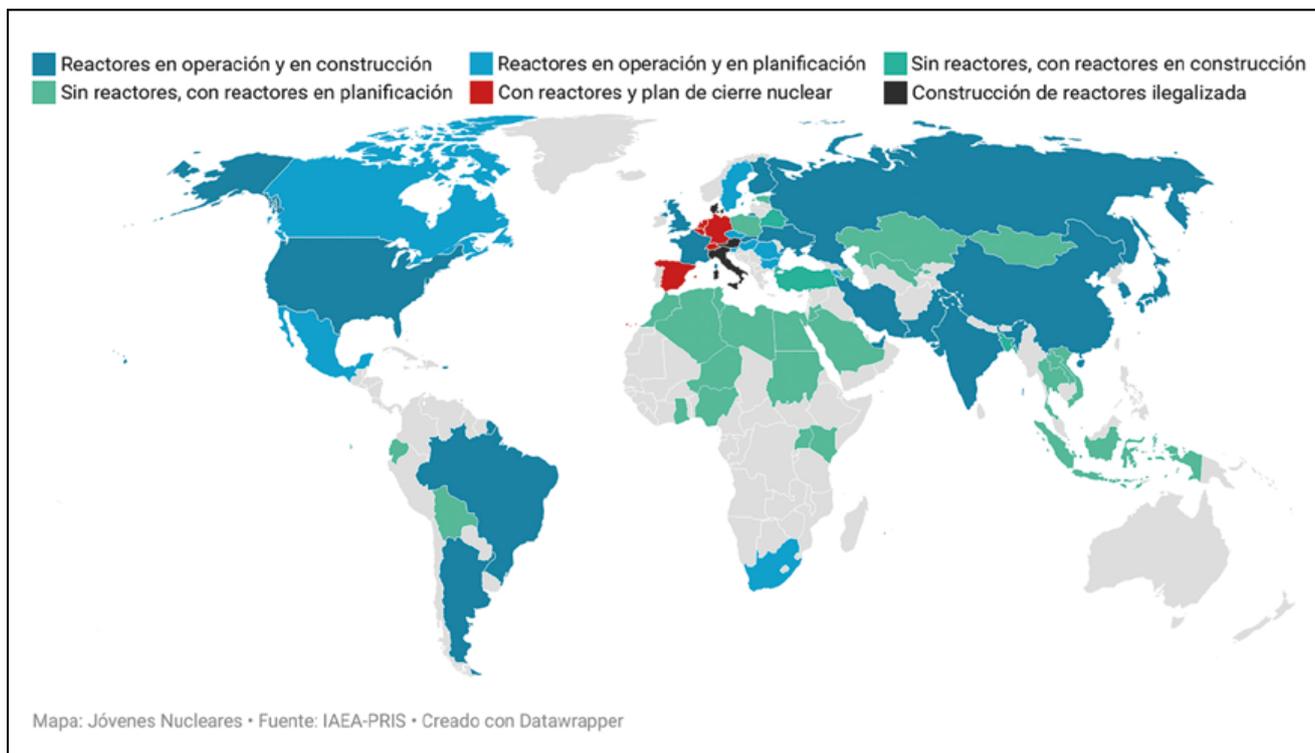


**Figura 4.** Evolución de la potencia instalada en sistema eléctrico nacional entre 2007 y 2021.

han disminuido de forma significativa sus costes. Aquí introducimos el papel del coste nivelado de la energía o *LCOE* por sus siglas en inglés (*Levelized Cost Of Energy*). El *LCOE* es un indicador que mide el coste total de construir y operar una instalación de generación a lo largo de su vida útil, en unidades de €/MWh (o USD/MWh). Un *LCOE* bajo respecto al resto de energías colocaría a la energía nuclear en una posición favorable en términos económicos, como muestra el último informe conjunto entre la *International*



**Figura 5.** Evolución de la cobertura de demanda del sistema eléctrico nacional por fuente entre 2007 y 2021 en GWh (REE, 2022).



**Figura 6.** Estado de desarrollo de la producción de energía eléctrica basada en tecnología nuclear en 2020 (IAEA, PRIS, 2022).

Energy Agency y la OECD Nuclear Energy Agency sobre la competitividad de las energías bajas en emisiones de CO<sub>2</sub> (IEA, OECD/NEA, 2020). Dentro de la comunidad científica, existen voces críticas con el papel del LCOE como indicador de la rentabilidad de las diversas fuentes de energía desde el punto de vista del consumidor final, o del *mix* eléctrico en el que se desarrollan, puesto que el LCOE no tiene en cuenta el coste de cubrir la demanda eléctrica durante los periodos de no disponibilidad de la instalación en cuestión, ni bonifica la disponibilidad de aquellas fuentes de energía necesarias para abastecer la demanda instantánea de electricidad.

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTORES MODULARES PEQUEÑOS

Los reactores modulares pequeños o *Small Modular Reactors* (SMR), por sus siglas en inglés, producen una potencia inferior a los 300 MWe, y constituyen un ejemplo de la característica escalable de la energía nuclear. Son instalaciones modulares, ya que su construcción no se realiza completamente *in situ*, sino que se pueden fabricar por módulos en serie en una fábrica y, además, tienen gran capacidad de adaptación a la red eléctrica a la que pretenden conectarse, ya que agrupaciones de varias unidades pequeñas pueden dar lugar tanto a instalaciones de mayor potencia, como a configuraciones de generación distribuida aptas para las infraestructuras de transporte y distribución más sencillas.

Antes de hablar de las características técnicas de los reactores es necesario incidir en los diferentes criterios que se utilizan para clasificarlos según la tecnología que utilizan. En primer lugar, atendiendo al tipo de combustible que utilizan, se pueden encontrar reactores de uranio natural o reactores de uranio enriquecido, aunque en los últimos años, con el reciclado de combustible, también se

aprovecha el contenido de plutonio del combustible irradiado para fabricar un combustible de óxidos mixtos de uranio y plutonio (*MOX*). En segundo lugar, los reactores pueden clasificarse según el espectro energético de su flujo neutrónico. Cuando los neutrones se producen en las reacciones de fisión lo hacen con una energía elevada de 2 MeV en promedio. Si los neutrones necesitan «frenarse» para inducir nuevas fisiones, como es el caso de los reactores que utilizan uranio-235 como combustible, en el reactor debe existir un material contra el que los neutrones choquen y puedan perder energía mediante colisiones inelásticas, ralentizándose. A este material se le denomina *moderador*, y a este tipo de reactores se les conocer como *reactores térmicos*. Sin embargo, si no es necesario frenar los neutrones de fisión para mantener la reacción de fisión en cadena, estaremos hablando de *reactores rápidos*. Otro criterio usado es el tipo de moderador que utilizan los reactores, que puede ser agua ligera, agua pesada, sales fundidas o grafito, dependiendo del combustible que utilicen. Y, por último, los reactores también pueden clasificarse según el refrigerante que evacua el calor del reactor, que puede ser agua, CO<sub>2</sub>, helio, sodio o plomo fundido, o sales fundidas como el fluoruro de litio o el fluoruro de berilio.

#### 3.1. Contexto tecnológico e innovación en los SMR

En la actualidad, los reactores que constituyen el grueso del parque nuclear mundial son los denominados reactores de segunda generación o Generación II, que fueron construidos durante el último tercio del siglo XX. Estos reactores ya suponen una evolución respecto a la primera generación de reactores nucleares, cuya misión era demostrar la producción de energía eléctrica de origen nuclear con un amplio abanico de tecnologías de potencia eléctrica reducida no estandarizada, desde los 5 MWe hasta los 190 MWe. Sin embargo, los reactores de Generación II tienen

tamaños estandarizados con una potencia eléctrica de alrededor de los 1.000 y los 1.500 MWe, o de forma equivalente, una potencia térmica entre 3.000 y 4.500 MWt. El diseño que domina el parque de generación nuclear actual es el del reactor térmico de uranio enriquecido que utiliza agua ligera como moderador, es decir, que utiliza agua para ralentizar el movimiento de los neutrones, lo cual hace más probable que se produzca la reacción de fisión, así como para refrigerar el núcleo del reactor y extraer la energía térmica producida. Estos son los reactores de agua ligera o *Light Water Reactors (LWR)*.

Dentro de los *LWR* podemos diferenciar aquellos que utilizan agua a presión y los que utilizan agua en ebullición. Los primeros, conocidos como *Pressurized Water Reactors (PWR)*, tienen elevadas presiones en el circuito del reactor, alrededor de los 15 MPa, por lo que el agua no llega a cambiar de fase, produciéndose únicamente una leve ebullición nucleada subenfriada. Los segundos trabajan a una presión inferior, de alrededor de 7 MPa, y se sirven del cambio de fase para refrigerar el reactor, por ello se denominan *Boiling Water Reactors (BWR)*. En España, los reactores de Almaraz I y II, Ascó I y II, Vandellós II y Trillo son reactores PWR, y el reactor de Cofrentes es de tipo BWR. Estos diseños son “mega factorías” de energía por su gran potencia instalada, entre los 1.000 MWe y los 1.400 MWe tras las subidas de potencia respecto a su diseño inicial. Debido a su diseño, a la cantidad de sistemas de seguridad que utilizan y a la cualificación nuclear que requieren los equipos -esto es, la certificación de que cumplen con los más altos estándares de la industria-, han necesitado una fuerte inversión inicial, y largos periodos de construcción de alrededor de los 10 años. En Canadá y en Rumanía también existen otras tecnologías de Generación II, mucho menos extendidas, como los reactores tipo *CANDU (Canadian Deuterium Uranium)* moderados y refrigerados por agua pesada, y que utilizan uranio natural como combustible.

Los primeros diseños de *SMR* trasladan el diseño tradicional de los reactores de agua ligera a la pequeña escala en un movimiento ágil de la industria, que busca el escalado de tecnología ya probada en las generaciones anteriores para agilizar los procesos de diseño y licenciamiento. Tanto los diseños *PWR* como los diseños *BWR* han encontrado sus equivalentes en modelos como el de la empresa NuScale o el BWRX-300 de General Electric. En un estadio temprano de implantación de la tecnología, la innovación de los *SMR* no se encuentra en la física del reactor, sino en su nuevo tamaño, que le confiere una mejora en su competitividad económica, y en los sistemas pasivos que utiliza, los cuales consiguen reducir los costes del proyecto a la vez que aumentan el grado de seguridad de estos reactores.

Otros conceptos innovadores en los *SMR* es que su capacidad de adaptación a la demanda ya se incorpora en el diseño inicial y, por tanto, hacen del recurso energético nuclear una fuente de generación de energía eléctrica despachable, con mayor capacidad para el seguimiento de la demanda eléctrica que sus hermanos mayores. En el medio y largo plazo, se investigan otras tecnologías resucitadas de la primera generación de reactores nucleares, y que ahora se consideran Generación IV, en tamaño *SMR*, como los reactores refrigerados por gas a alta temperatura, los reactores de espectro neutrónico rápido y los reactores de sales fundidas, entre otros. El funcionamiento de estos reactores

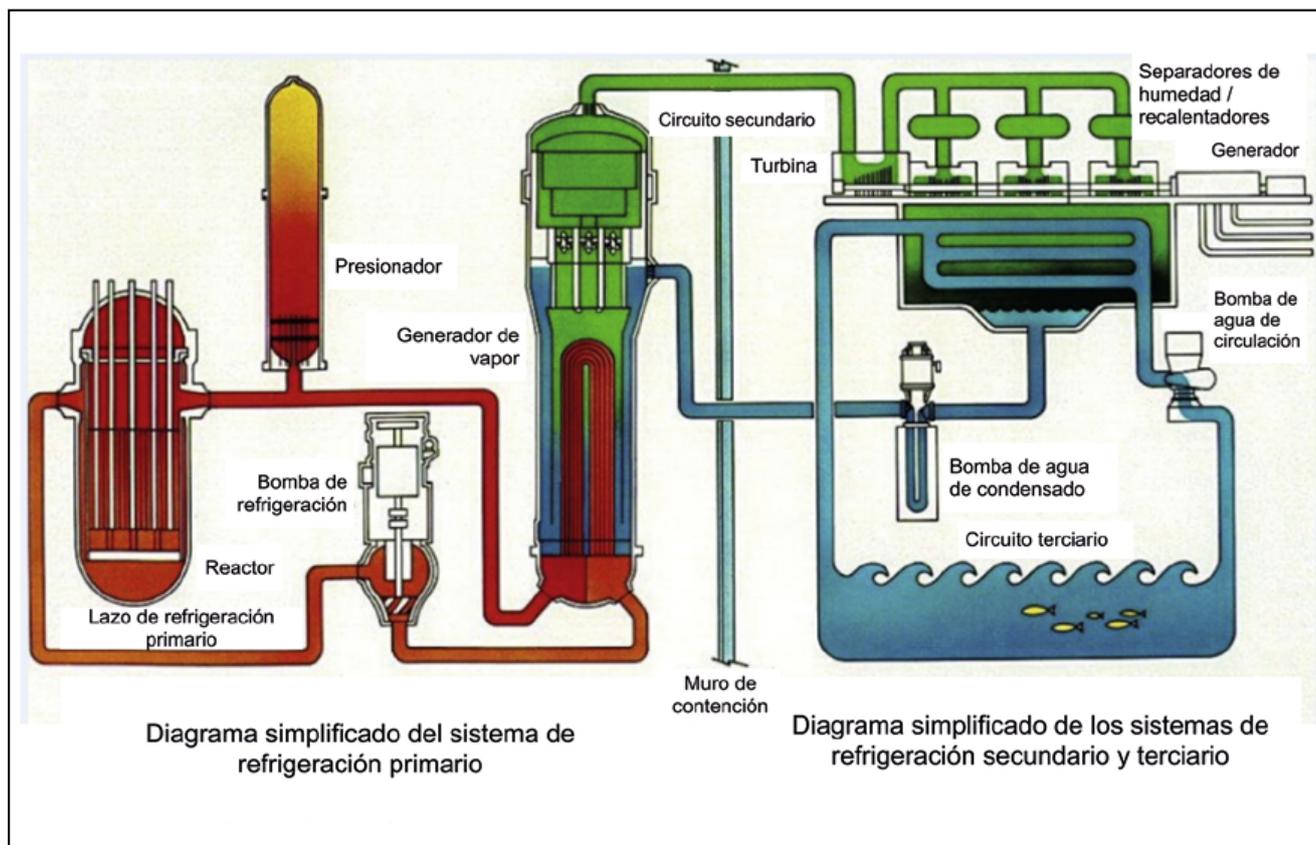
supone un cambio sustancial en la física del reactor, con el objetivo de obtener mayor energía del combustible y reducir la cantidad y la duración del residuo radiactivo generado. Esto tiene como consecuencia un aumento de la duración de las reservas de uranio actuales, además de poder aprovechar otros combustibles como el torio, que cuenta con mayores reservas que el uranio. Actualmente hay más de 50 diseños de *SMR* en desarrollo (IAEA, 2020).

### 3.2. Componentes principales de un reactor nuclear PWR

Para ilustrar algunas diferencias entre los reactores actuales y los *SMR* utilizaremos, como ejemplo, el reactor *SMR* de NuScale Power LLC de la figura 7. Pero antes de entrar en el análisis de las diferencias entre los diseños de los primeros *SMR* y los reactores nucleares actuales, es



**Figura 7.** Perspectiva de corte del reactor *SMR* de NuScale (Fuente: NuScale Power LLC).



**Figura 8.** Diagrama simplificado de los circuitos de refrigeración en un reactor tipo PWR. Adaptación al castellano (Cummins y Matzie, 2018).

preciso introducir los circuitos y componentes principales de un reactor nuclear para describir su funcionamiento. Para ello, se utilizará como ejemplo el diseño de un reactor tipo PWR, que, para extraer el calor del reactor y transformarlo en electricidad, utiliza hasta tres circuitos de agua denominados *primario*, *secundario* y *terciario* (figura 8).

### 3.2.1. Circuitos de refrigeración en una central nuclear

En primer lugar, el circuito de refrigeración primario es el que se encuentra en contacto directo con el reactor nuclear y tiene la función de transmitir la potencia térmica generada en el núcleo del reactor hasta el circuito de refrigeración secundario. El primer elemento de este circuito es la vasija del reactor, que contiene los elementos combustibles, que componen el núcleo del reactor, en su interior, y por el que circula el agua a presión, recorriendo el núcleo en dirección ascendente. Cuando el agua sale del reactor puede hacerlo a través de una de las ramas calientes de los tres lazos que componen el circuito primario. En cada lazo encontramos, por orden, un intercambiador de calor de carcasa y tubos, llamado generador de vapor, y una bomba que devuelve el agua a la vasija del reactor. En uno de los tres lazos se encuentra otro elemento denominado presionador, que tiene la misión de regular la presión del circuito primario, absorbiendo los cambios de volumen del agua durante los procesos de calentamiento y enfriamiento del circuito. Todos estos sistemas se encuentran dentro de la contención de hormigón armado del reactor. El agua del circuito primario circula por el lado de los tubos en el generador de vapor, cediendo su energía térmica al agua que se encuentra

en el lado de la carcasa, por el que circula el agua del circuito secundario, y que se transforma en vapor durante el intercambio de energía por encontrarse a una presión inferior. El circuito secundario es donde tiene lugar el ciclo termodinámico, y, por tanto, transfiere el vapor seco desde el generador de vapor hasta las diferentes etapas de la turbina. Una vez que el agua atraviesa la turbina, entra en el condensador, donde cambia de nuevo de fase para ser bombeada a través de las bombas de alimentación principal hacia el generador de vapor. Estos sistemas se encuentran en el edificio de turbinas de la central. El último circuito es el circuito de refrigeración terciario, que tiene la misión de evacuar el calor que resulta del proceso de condensación que ocurre en el circuito secundario. Para ello, utiliza una corriente de agua externa, por ejemplo, de un río o del mar, que actúa como sumidero último de calor durante la operación normal del reactor. Con este propósito también puede servirse de torres de refrigeración, que son esenciales para reducir el impacto del calentamiento del agua en los ríos, de modo que parte de la corriente es evaporada en torres de refrigeración para limitar el salto térmico del caudal aguas abajo de la central nuclear.

### 3.2.2. Ciclo de operación en un reactor PWR

Desde el punto de vista de la operación, en los reactores PWR actuales se introduce combustible de uranio enriquecido hasta el 5 % en isótopos de uranio-235 para lograr un ciclo de operación de 18 meses aproximadamente, y producir una potencia térmica de más de 3.000 MW. Con este enriquecimiento tienen que asegurar que pueden mantener la reacción en cadena de forma estable

durante todo el ciclo de operación, es decir, que pueden mantenerse en lo que denominamos estado “crítico”. Ese enriquecimiento irá disminuyendo a medida que avance el ciclo de operación debido a que los isótopos de uranio-235 se consumen durante la producción de energía, disminuyendo la capacidad de producir reacciones de fisión en el reactor, o, reactividad. Por tanto, si no hiciésemos nada al respecto, no tendríamos concentración de uranio suficiente para mantener la reacción de fisión en cadena. La solución reside en el mecanismo de control de la reactividad empleado. Al principio del ciclo, el enriquecimiento es superior al necesario para mantener la reacción en cadena, pero, para evitar que el uranio reaccione de forma rápida y la reacción en cadena se acelere (estado “supercrítico”), se introduce un absorbente neutrónico en el reactor, el boro-10, en forma de ácido bórico disuelto en el refrigerante.

El boro-10 tiene la misión de absorber los neutrones que nos conducirían a ese estado supercrítico (el exceso de reactividad), de modo que al principio de ciclo el reactor se mantiene en estado crítico. Durante el ciclo de operación, conforme se consume el uranio-235 y disminuye la reactividad del reactor, también se disminuye la concentración de absorbente para compensar esta pérdida de reactividad, en lo que se denominan diluciones de boro, por lo que la reacción en cadena se mantiene y el reactor se encuentra crítico durante todo el ciclo de operación. Este llega a su fin cuando la concentración de boro es nula, de modo que ya no se puede seguir diluyendo para compensar la disminución de la concentración de uranio-235.

Si bien el boro es un mecanismo de compensación de la reactividad, se trata de un mecanismo de control «lento», y que no es práctico cuando se quiere variar significativamente la potencia del reactor de manera instantánea. Con este propósito, actúa el sistema de barras de control, un sistema de control de la reactividad más rápido. Las barras están compuestas por materiales absorbentes de neutrones, como la plata, el indio y el cadmio (AIC), o el carburo de boro ( $B_4C$ ). Al ser introducidas en el reactor nuclear, absorben los neutrones de forma instantánea, y, por tanto, tienen un efecto inmediato sobre la reacción en cadena, que puede ser detenida en menos de 5 segundos.

Una vez que se ha hecho hincapié en el funcionamiento básico de un reactor nuclear PWR de segunda generación, en los siguientes subapartados nos centraremos en analizar qué características han experimentado un cambio sustancial y cuáles se mantienen en el diseño del reactor de NuScale.

### 3.3. Características del SMR de NuScale

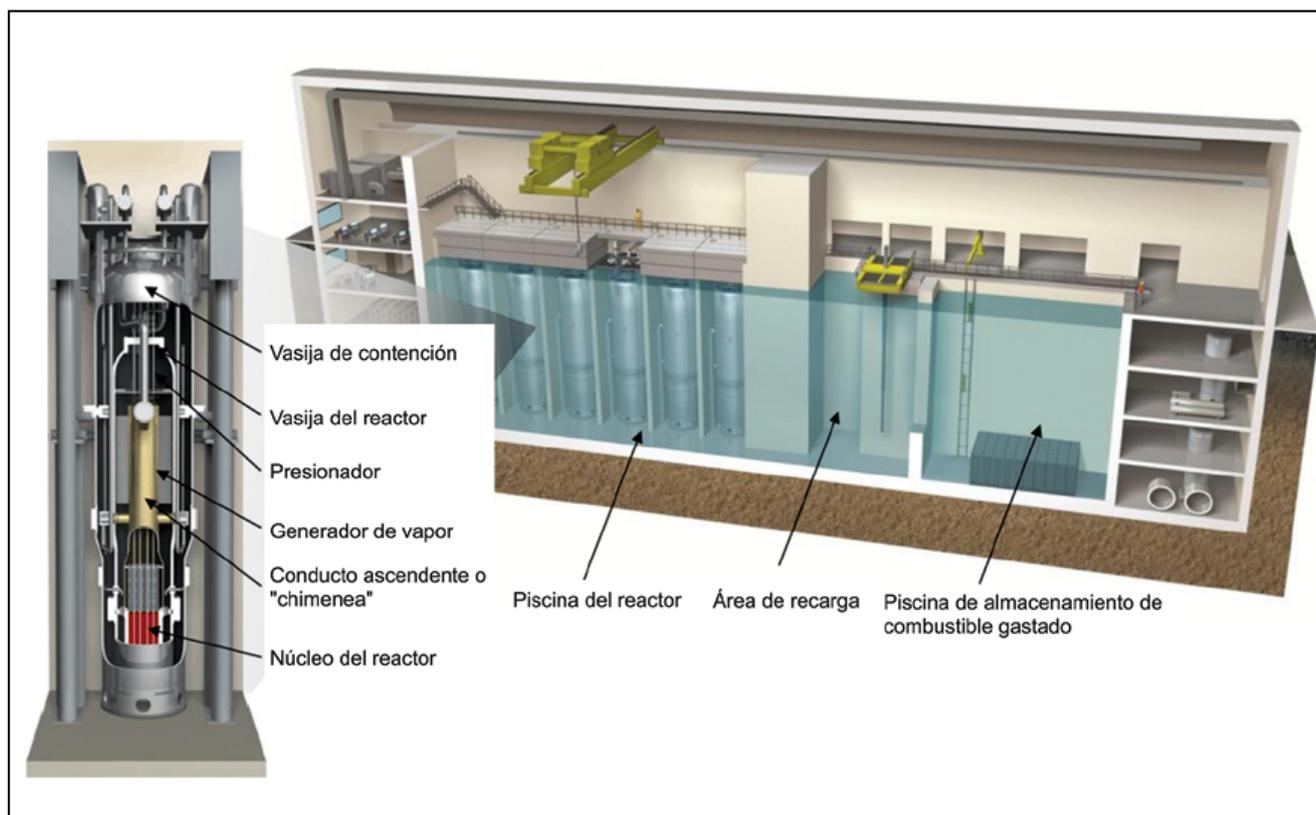
El reactor de NuScale es un reactor de 77 MWe, por lo que su núcleo debe ser capaz de producir en torno a 250 MW de potencia térmica (MWt), sustancialmente inferior a los 4.000 MWt de sus hermanos mayores. En este reactor SMR podemos encontrar la vasija del reactor, que contiene el núcleo constituido por elementos combustibles de sección cuadrada de 2 m de altura activa frente a los aproximadamente 4 m de los reactores grandes, y que se encuentra localizado en la parte inferior de la vasija. Los elementos combustibles, de color rojo en la figura 7,

están constituidos por agrupaciones de vainas de circonio que contienen pastillas de óxido de uranio apiladas en su interior. Mientras que la sección transversal de los elementos es igual a de los grandes PWR, de geometría rectangular de 17 x 17 barras de combustible con 25 tubos de agua para alojar las barras de control del reactor, su altura es considerablemente inferior, poco más de la mitad. El núcleo está constituido por 37 elementos combustibles, frente a los 157 de los reactores PWR de segunda generación o los 241 del reactor *EPR* (*European Pressurized Reactor*) de tercera generación. Los diseños SMR de agua ligera muestran una densidad de potencia considerablemente inferior, aproximadamente la mitad, en comparación con los diseños grandes, aunque otros diseños de SMR basados en flujos neutrónicos de espectro rápido pueden obtener densidades de potencia muy superiores. El óxido de uranio utiliza los mismos enriquecimientos de hasta el 5 % que los reactores actuales, aunque algunos diseños SMR también estarían habilitados para utilizar combustible MOX y desarrollar ciclos de operación superiores a los dos años actuales. En el caso de otros diseños de SMR, podría utilizarse combustible con un enriquecimiento superior de hasta el 19 %, conocido como HALEU, para obtener ciclos de operación de hasta 20 años.

#### 3.3.1. Sistemas de refrigeración pasivos

En el caso de NuScale hablamos de un reactor de diseño integral, en el que los elementos del circuito de refrigeración primaria están contenidos en el mismo recipiente: la vasija del reactor. Esta es una diferencia clave frente a los reactores PWR, que se explicaron anteriormente y en los que todos los componentes del circuito primario del reactor se encuentran fuera de la vasija, ya que simplifica sustancialmente el diseño del circuito, así como la operación y el mantenimiento de la unidad. La vasija del reactor, a su vez, está rodeada de vacío en el interior de una segunda vasija, denominada *vasija de contención*.

En la figura 9 se muestran los principales componentes del reactor. Para evacuar el calor de todo el conjunto, el refrigerante recorre el núcleo desde su parte inferior hasta las cotas más altas. Al llegar a la parte superior del núcleo, entra en un conducto más largo que el núcleo, pero más estrecho, conocido como *riser*, generando efecto chimenea para circular el refrigerante sin necesidad de motobombas. Al salir de este conducto, el flujo alcanza al presionador en el espacio superior de la vasija del reactor y cambia su dirección hacia abajo por la periferia exterior del *riser*, llegando a los generadores de vapor por el lado del circuito primario, y que también se encuentran dentro de la vasija del reactor. Este calor se transfiere a través de las paredes de un generador de vapor helicoidal hacia el circuito secundario donde se genera el vapor que será llevado hacia el sistema de generación de potencia eléctrica, escapando de la vasija del reactor y de la vasija de contención mediante unos conductos hacia el grupo generador del módulo. Por último, en este SMR la bomba que recircula el flujo desde el generador de vapor a la parte inferior del núcleo desaparece, ya que el flujo está impulsado por la circulación natural. No obstante, en otros diseños de SMR sí que podremos encontrar otro tipo de bombas,



**Figura 9.** Componentes del reactor de NuScale, en una instalación que agruparía 12 módulos, todos ellos sumergidos en una piscina que actuaría como sumidero último de calor (Ingersoll *et al.*, 2014).

mucho más compactas en comparación con las de los reactores de segunda generación.

### 3.3.2. Ciclo de operación y control de la reactividad

Desde el punto de vista del control de la potencia (o de la reactividad), los elementos de control son completamente análogos a los de los reactores PWR actuales: utilizan boro para compensar la pérdida de reactividad debida al consumo del uranio mediante diluciones de boro, y utilizan barras de control compuestas por dos secciones diferentes: la sección inferior de la barra de control (la primera que se introduce en el reactor, ya que las barras se introducen de arriba hacia abajo) está compuesta de plata, indio y cadmio, y la parte superior de las barras está compuesta por carburo de boro, que tiene un mayor poder de absorción de neutrones para detener o ralentizar de forma más eficaz la reacción en cadena. Cabe mencionar que todas las similitudes que encontramos con los reactores actuales tienen un impacto positivo tanto en el diseño del reactor como en su licenciamiento, ya que el marco regulatorio que debe desarrollarse para licenciar estos reactores es otro foco del esfuerzo que actualmente desarrollan los grandes organismos reguladores en materia de seguridad nuclear.

## 4. VENTAJAS DE LOS REACTORES MODULARES PEQUEÑOS

### 4.1. Modularidad

La modularidad, en el contexto de los SMR, hace referencia a la capacidad de fabricar componentes y módulos

de estos reactores. Esta característica modular ya se practica en los reactores de Generación III+. Sin embargo, en el caso de los SMR las acciones necesarias para su construcción se han limitado sustancialmente, con lo que se pueden reducir los tiempos de construcción de forma significativa, además de los costes de fabricación. Esta filosofía permitiría producir en cadena los componentes y módulos necesarios, que se pueden fabricar, transportar y montar con mayor facilidad. Si las plantas chinas de más reciente construcción, como Tianwan 5 y 6 y Fuqing 5, han alcanzado tiempos de construcción de entre 5 y 6 años, la agrupación de módulos de NuScale podría estar acabada antes de los 3 años tras el vertido del primer hormigón, u hormigón nuclear. La modularidad también supone una ventaja desde el punto de vista de la seguridad energética, ya que los periodos de recarga se pueden llevar a cabo de forma planificada e independiente para cada módulo, por lo que este periodo no supone la pérdida completa de la producción energética de la planta, al poder llevarse a cabo de forma secuencial para los diferentes módulos.

### 4.2. Emplazamiento

Un factor limitante a la hora de construir una central nuclear es el emplazamiento, ya que existen restricciones a la hora de ubicar un reactor en emplazamientos que, por ejemplo, no tienen una infraestructura adecuada para instalar una central nuclear de gran tamaño (accesos difíciles, redes eléctricas limitadas, limitación de refrigeración si no se dispone de un gran sumidero de calor como puede ser un río o el mar, etc.). Los SMR pueden adaptarse a este tipo de emplazamientos ya que tienen menores necesidades del entorno exterior en cuanto a tamaño de la red eléctrica se

refiere, o de fuentes de refrigeración por sus potencias inferiores y diseños de evacuación de calor mejorados basados en la convección natural.

### 4.3. Integración en el parque de generación

Por su inferior tamaño y su versatilidad, los SMR pueden dar lugar a configuraciones más versátiles en el parque de generación junto con las energías renovables, pues integran sistemas más avanzados de seguimiento de carga y pueden adaptar su producción funcionando en régimen de cogeneración para producir calor industrial, calefacción de distrito, o producción de hidrógeno mediante electrólisis. Esto permite maximizar el aprovechamiento del combustible, ya que pueden operar en un entorno de demanda y producción de energía cambiante, acumulando energía cuando esta no sea necesaria en forma de hidrógeno, listo para ser utilizado también como vector energético.

### 4.4. Seguridad nuclear

Desde el punto de vista de la seguridad nuclear, los reactores modulares han implementado técnicas de diseño de los sistemas de seguridad que en su conjunto han logrado disminuir hasta cuatro órdenes de magnitud la frecuencia de daño al núcleo. Esta frecuencia de daño al núcleo, o *Core Damage Frequency, CDF* por sus siglas en inglés, es un parámetro utilizado en seguridad nuclear para medir el grado de seguridad de un reactor nuclear. Se obtiene como resultado de un análisis probabilista de seguridad que contempla todos los sucesos iniciadores de accidentes, a los que se les asocia una probabilidad de ocurrencia, y los combina con las respectivas secuencias de respuesta de la planta a dicho suceso iniciador, sistema por sistema, componente a componente, incorporando en el cálculo la probabilidad de fallo de todos los equipos. Para los reactores de Generación II estaríamos hablando de una cifra de  $10^{-6}$ , es decir, que podría ocurrir un accidente severo con una frecuencia de una entre un millón, para los reactores de Generación III y III+ esta cifra ya se había disminuido

hasta  $10^{-8}$ , mientras que para los diseños actuales de reactores SMR, la probabilidad de accidente severo sería de una entre diez mil millones. Esto es consecuencia de la disminución de componentes y de la incorporación de sistemas de refrigeración pasiva, tanto para la operación normal del reactor, como para su respuesta en caso de secuencia accidental.

En el caso concreto de NuScale, el diseño contempla la refrigeración por circulación natural en todo momento, por lo que no requiere de bombas para la refrigeración del núcleo. También se ha disminuido el número de componentes activos, que implica que los componentes no requieren de alimentación eléctrica (por lo que disminuirían la probabilidad de accidente motivada por un *Station Blackout, SBO*, o un suceso de *Loss Of Off-site Power, LOOP*), y que disminuye su probabilidad de fallo al depender de fuerzas naturales como la gravedad de forma directa o indirecta mediante la diferencia de densidades como fuerza motora de la circulación de los fluidos. Durante la operación normal, la energía producida en la reacción nuclear calienta el circuito primario del reactor, haciendo que el fluido caliente ascienda por el reactor por convección natural, como se ha explicado anteriormente.

Desde el punto de vista del accidente severo, los SMR tienen una mayor relación superficie volumen y una estrategia de refrigeración basada en sistemas de seguridad pasiva, por lo que aumenta la eficiencia de la evacuación de calor. En este diseño, la vasija de contención se encuentra rodeada de agua al estar sumergida en una piscina que tiene una doble función: último sumidero de calor y blindaje de la radiación. En consecuencia, teniendo en cuenta la baja potencia del reactor, se asegura la refrigeración a largo plazo sin necesidad de alimentación de potencia eléctrica del exterior por convección natural en caso de accidente.

Este diseño implica que el *coping time*, o tiempo entre el inicio de la secuencia accidental y el momento en el que se produce una pérdida de geometría en el núcleo que impida la refrigeración del reactor, es ilimitado en el caso de ocurrencia de eventos similares al que se produjo en el accidente de Fukushima, un *SBO*. En caso de accidente, al producirse el disparo del reactor, esto es, la introducción

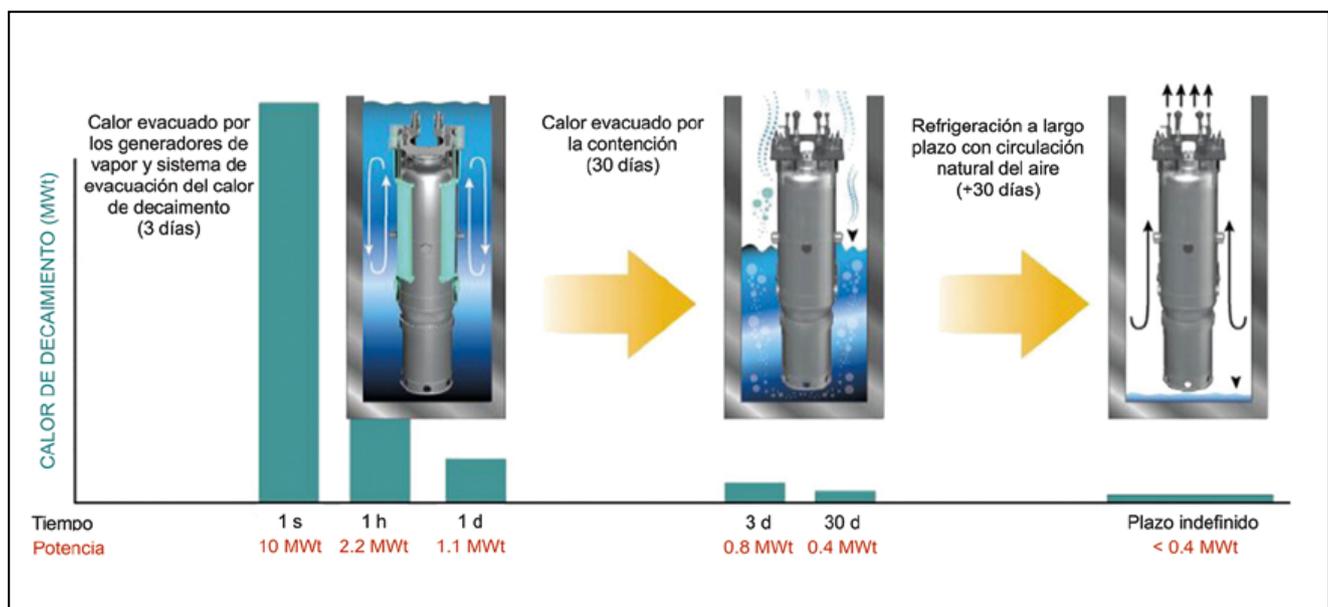


Figura 10. Evolución de los mecanismos de refrigeración hasta el largo plazo en caso de accidente SBO para NuScale (Di Giuli, 2015).

repentina de las barras de control para ejecutar su parada, la potencia nuclear, que proviene de reacciones de fisión, se hace prácticamente cero de forma instantánea. Sin embargo, en el núcleo se sigue produciendo calor debido, principalmente, a la desintegración de todos los núcleos inestables que se generan como resultado de la escisión en dos o más partes de los átomos de uranio. Este es el calor de las desintegraciones radiactivas, que muestra una evolución como la de la figura 10. Si no se encuentra operativo otro sistema que pueda retirar esta energía, el sistema de seguridad pasiva del reactor debe estar diseñado para eliminar gradualmente este calor residual mediante diferentes mecanismos. En los primeros instantes, el refrigerante que se encuentra dentro de la vasija del reactor se calienta, aumentando la presión de esta hasta alcanzar el *set-point* de las válvulas de alivio, que al abrirse permiten al refrigerante inundar el espacio existente entre la vasija del reactor y la vasija de contención. En ese momento, el calor empezará a transmitirse a través de las paredes de la vasija de contención hacia la piscina del reactor, que podrá retirar el calor mediante convección natural como muestra la figura 10 (derecha) en el caso de un único módulo dentro de la piscina del reactor.

#### 4.5. Seguridad física

Desde el punto de vista de la seguridad física, los SMR incluyen en su diseño barreras que pueden resistir el impacto de aviones entre otras amenazas naturales o de dolosa índole. Algunos SMR están diseñados para operar durante largos ciclos de operación sin realizar recargas de combustible, pudiendo ser sellados en fábrica, y minimizando las operaciones de recarga, para las que el reactor podría ser trasladado de nuevo a fábrica, minimizando el trasiego del combustible nuclear y las dosis a los trabajadores. Algunos SMR utilizarán combustible con un enriquecimiento idéntico al que se utiliza en los grandes reactores, aunque también estarán capacitados para funcionar con el combustible MOX y aprovechar el plutonio que resulta de las actividades de reciclado del combustible irradiado en los reactores que operan en la actualidad, aumentando el aprovechamiento del recurso de uranio del parque nuclear actual.

### 5. ASPECTOS ECONÓMICOS DE LOS SMR

Actualmente, nos encontramos en la implementación a gran escala de los reactores de Generación III y III+, también conocidos como reactores LWR avanzados y evolucionarios, respectivamente. Durante los años 80, el *Electrical Power Research Institute (EPRI)* de los Estados Unidos sentó las bases del diseño de las nuevas generaciones de reactores nucleares con el objetivo de mejorar su competitividad económica y su seguridad como respuesta al cambio de paradigma económico mencionado anteriormente (EPRI, 1986). En los diseños de Generación III se aumenta la competitividad aumentando su potencia y la vida de diseño (de los conocidos 40 años a los 60 años), y se mejorará la seguridad de los reactores, aumentando el número de redundancias en los sistemas de seguridad e incluyendo sistemas de seguridad que contemplan la ruptura de la vasija durante un accidente severo de fusión del núcleo.

Los reactores de Generación III+ incrementan su competitividad incluyendo además la construcción modular, que reduce los tiempos de construcción del reactor hasta un 50 %, e incluyendo sistemas de refrigeración del núcleo en operación normal, y sistemas de seguridad pasivos, mucho más fiables que los activos que dependen de alimentación eléctrica del exterior y que reducen el número de componentes necesarios como bombas y válvulas de forma drástica, con la reducción directa de costes que ello implica. Como reactor representativo de la Generación III podemos destacar el reactor *EPR* de Areva, que ya se encuentra en operación, siendo el primero en alcanzar criticidad en 2018 la unidad I de la Central Nuclear de Taishan (China) de 1660 MWe de potencia, con un coste de 3.800 millones de euros y un tiempo de construcción de 10 años. Otro diseño representativo de la Generación III+ es el reactor AP1000 de Westinghouse, cuyo primer modelo entró en operación en 2018, también, en la Central Nuclear de Sanmen (China), que consta de dos unidades de 1157 MWe de potencia, con un tiempo de construcción de 10 años, pero con un coste conjunto de 6.900 millones de euros. Es preciso aclarar que estos tiempos de construcción también son más largos que los previstos, ya que se trata de los reactores *First Of A Kind (FOAK)*, es decir, los primeros de su clase y que, por tanto, conllevan sobrecostes asociados y demoras en los tiempos de construcción.

Estos nuevos diseños comienzan a responder a las necesidades del contexto actual, en los que las necesidades de ritmo de la transformación energética requieren disminuir aún más los tiempos de construcción, y aumentar la competitividad de la energía nuclear en relación con la competitividad económica de las energías renovables para favorecer su participación en los mixes eléctricos de cero emisiones netas. Las ventajas ya mencionadas de los SMR contribuyen a favorecer su viabilidad económica en comparación con otras tecnologías de cero emisiones por su larga vida útil, el coste de su construcción, y de su operación vaticinan efectos positivos sobre la reducción del *LCOE*. Además, no solo es necesario disminuir el *LCOE* de las nuevas plantas, sino también disminuir el coste de la inversión inicial para hacer más atractiva su financiación, obteniendo como resultado un producto más atractivo para la inversión pública y privada. Esta presión sobre la viabilidad económica se ha visto amplificada por la disminución del *LCOE* de las energías renovables que han configurado un nuevo entorno al que la industria nuclear está respondiendo, extendiendo la operación de las centrales nucleares ya existentes hasta 80 años. Esta extensión de vida útil disminuye el *LCOE* de la energía nuclear igualándolo al de las energías renovables, como se muestra en la figura 11, y aumenta la competitividad económica de sus reactores con tecnologías como los SMR (Solan *et al.*, 2010).

Es de reseñar, que, aunque la energía nuclear se encuentra actualmente en el podio de energías con menor *LCOE*, el cálculo considera factores de capacidad del 85 %, por lo que teniendo en cuenta factores más elevados este resultado sería susceptible de mejora. Sin embargo, hay que indicar que el *LCOE* de una tecnología que se utiliza como potencia de base muestra gran sensibilidad al factor de capacidad de la planta, por lo que en un escenario

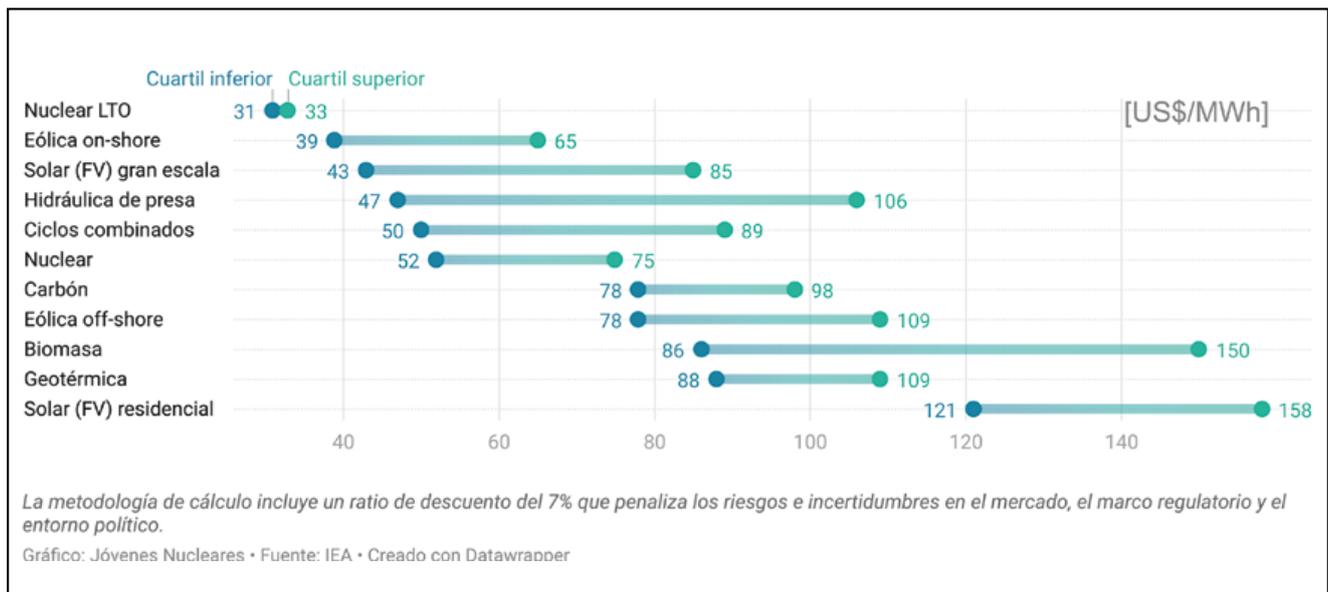


Figura 11. Cuartiles del LCOE para varias tecnologías de generación eléctrica (IEA, OECD/NEA, 2020).

en el que la energía nuclear participa con otras fuentes de energía con mayor variabilidad, es necesaria una respuesta tecnológica para mantener unos valores de LCOE competentes.

Los SMR y sus diversas aplicaciones ya se postulan como una respuesta ante este tipo de escenarios y aparecen en escena para resolver los problemas que enfrenta la industria nuclear en la actualidad. Abordan, por ejemplo, la reducción del LCOE para competir con otras fuentes de energía y asegurar el suministro de energía baja en emisiones de CO<sub>2</sub>. No obstante, su mayor ventaja desde el punto de vista económico es la reducción de los costes iniciales o capitalizados al aprovechar las ventajas de la estandarización, la fabricación en serie y la economía de escala, lo que supone un atractivo desde el punto de vista del inversor. Según las estimaciones de la U.S. Nuclear Regulatory Commission, el organismo competente en materia de regulación y seguridad nuclear de los Estados Unidos, un reactor SMR de 100 MWe tendría un coste inicial de alrededor de 500 millones de euros (Solan *et al.*, 2010), sustancialmente inferior a los 5000 millones de euros de los reactores de Generación III y III+.

En el caso del reactor de NuScale, su LCOE ya es competitivo respecto de la construcción de nuevos reactores de tamaño convencional en su versión FOAK, según estimaciones de la propia compañía realizadas para una agrupación de 12 módulos, cada uno de ellos constituido por su propio reactor y grupo de generación eléctrica correspondiente, que supondrían una potencia instalada de 920 MWe (NuScale LLC., 2020). El informe conjunto de la IEA y la OECD/NEA (IEA, OECD/NEA, 2020) establece una horquilla para el LCOE de los reactores de 1.300 MWe de nueva construcción entre los 40 y los 95 €/MWh, pudiendo competir con las energías emisoras como los ciclos combinados de gas. Las estimaciones de NuScale establecen un LCOE de 60 €/MWh para su reactor FOAK, que ya se encuentra dentro de esa horquilla, aunque lejos de los 30 €/MWh de las nucleares actuales con extensión de vida. Por otro lado, en la tabla 1 también se muestra una descomposición de los costes capitalizados por unidad de potencia instalada para reactores grandes y una estimación para el

FOAK de NuScale basada en proyecciones de la Idaho Public Utilities Commission en 2019 (Black *et al.*, 2019).

La comparativa entre los reactores, sin tener en cuenta la extensión de vida para el NuScale, es justa, ya que para el cálculo de ambos tipos de planta se han contemplado 60 años de vida útil: por un lado, los 60 de diseño de los nuevos reactores nucleares y de NuScale, y por otro lado los 40 años de diseño más los 20 de extensión para los reactores construidos durante los años 80. Este LCOE podría disminuir sustancialmente si se consolida una cadena de producción para los reactores NOAK (*N<sup>th</sup> Of A Kind*), ya que se reducirían de forma sustancial los costes de construcción. La inversión inicial en reactores SMR mejora a los reactores LWR convencionales en los costes directos de construcción (equipos, materiales, etc.) y ahorra alrededor del 70 % de los costes indirectos asociados a los servicios de diseño, gestión y supervisión de campo. Tanto el efecto de la LTO sobre el LCOE, como futuras mejoras de diseño

Reactor	LWR grande
Costes directos capitalizados (€/kW)	2517
Costes indirectos capitalizados (€/kW)	2 800
Costes capitalizados totales (€/kW)	5 317
Reactor	NuScale FOAK
Costes directos capitalizados (€/kW)	2411
Costes indirectos capitalizados (€/kW)	887
Costes capitalizados totales (€/kW)	3 298

Tabla 1. Costes de inversión por unidad de potencia instalada para NuScale y reactores LWR de tamaño convencional y nueva construcción en USA a diciembre de 2020 (Black *et al.*, 2019).

apuntan a que este reactor podría ganar aún más venta durante los próximos años, aunque actualmente las estimaciones contienen un nivel no desdeñable de incertidumbre asociado.

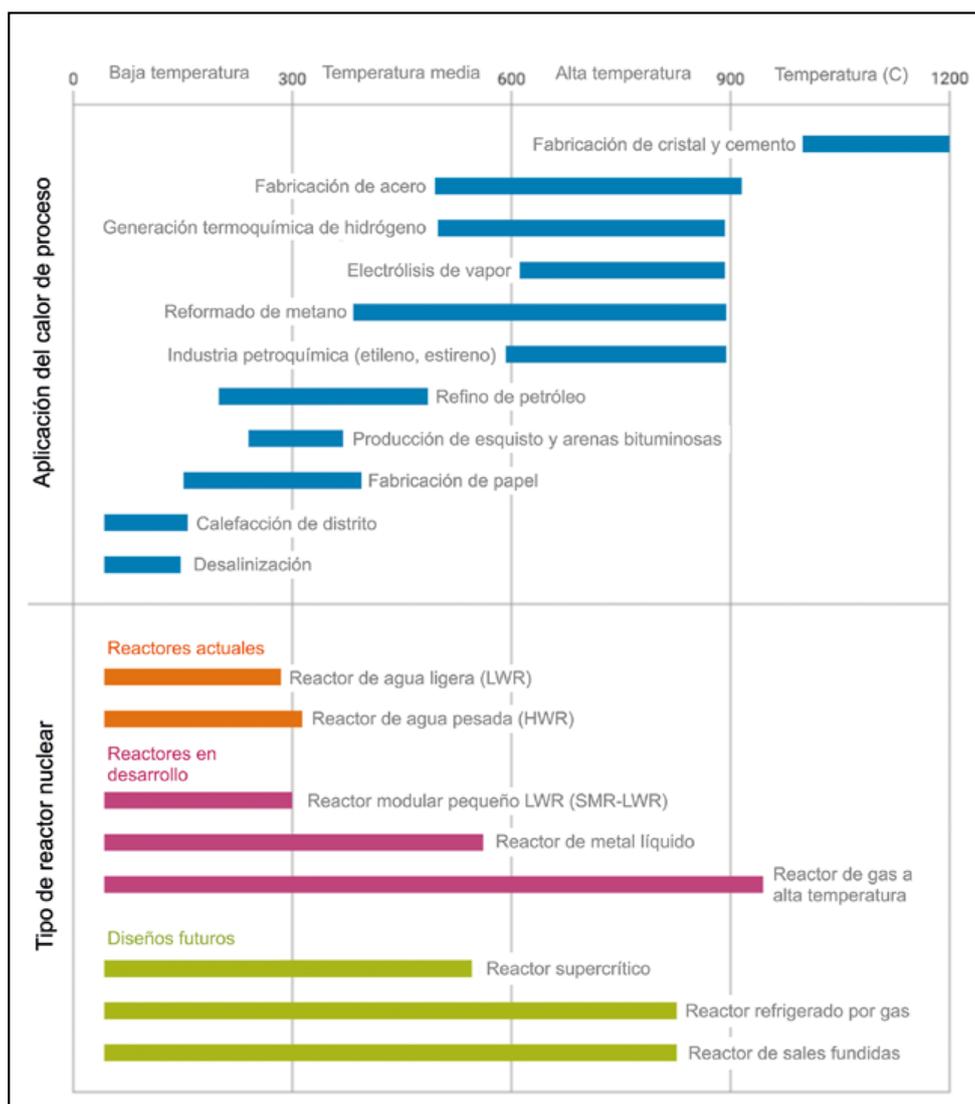
## 6. APLICACIONES DE LOS SMR

Las nuevas tecnologías de generación renovable y la consideración de nuevos vectores energéticos como el hidrógeno despliegan un amplio abanico de aplicaciones en las que los SMR tienen un papel muy importante que jugar, y no solo desde el punto de vista de la producción de electricidad. Las principales aplicaciones no eléctricas de los reactores SMR van desde el apoyo a la calefacción de distrito, en régimen de cogeneración, hasta su uso para la industria de producción de hidrógeno, pasando por su uso en el suministro de electricidad a zonas poco accesibles o la propulsión espacial.

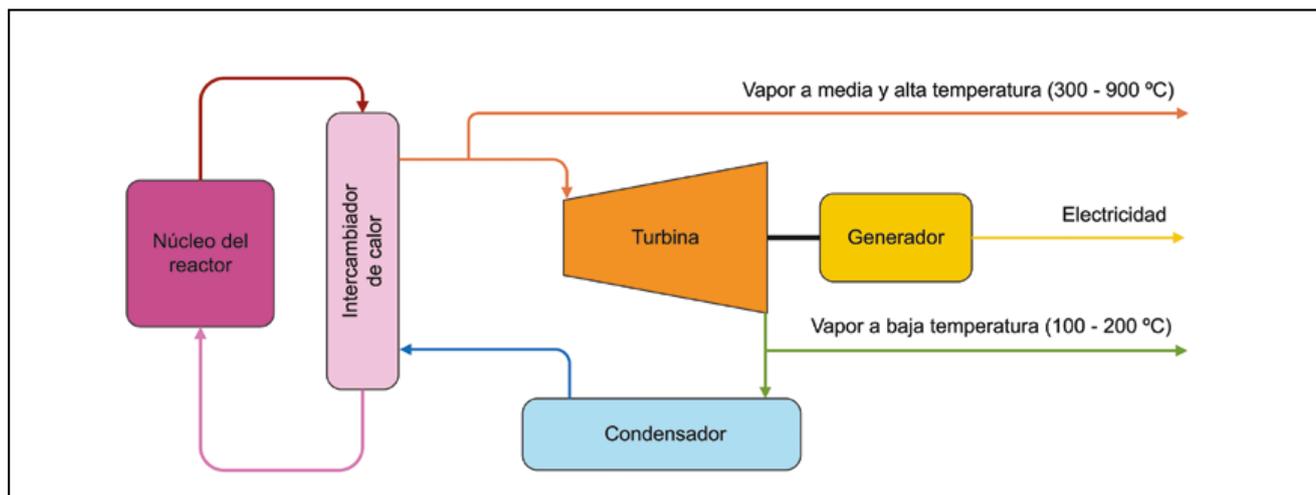
### 6.1. Cogeneración

La cogeneración para la producción de calor y electricidad está adquiriendo una importancia cada vez mayor en todo el mundo debido a la creciente demanda de energía

no solo en forma de energía eléctrica. La importancia de la producción combinada de calor y electricidad se deriva de la mejora de la eficiencia en el uso de combustible, y de la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Debido a que las plantas de cogeneración tienen más de una aplicación, consiguen mayor eficiencia que la generación de electricidad o subproductos de forma individual. Se considera que las grandes plantas de producción eléctrica, como nucleares o térmicas, son la opción más adecuada para la instalación de plantas de cogeneración (IAEA, 2017a). Centrándonos en las centrales nucleares, el calor generado puede emplearse en calefacción de distrito, desalinización o producción de hidrógeno, entre otras aplicaciones. El empleo de estas centrales para la producción conjunta de electricidad y calor para cualquiera de estos procesos consigue aumentar la eficiencia de la planta y los beneficios económicos de las mismas, así como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al empleo de combustibles fósiles para conseguir el vapor a altas temperaturas requerido para algunas aplicaciones, como las derivadas de la industria petroquímica. Sin embargo, no todas las centrales son capaces de dar soporte a las mismas aplicaciones, pues dependerá del tipo de tecnología,



**Figura 12.** Rangos de temperatura para la aplicación del calor de proceso y tipos de reactores nucleares. Adaptación al castellano (IAEA, 2017b; WNA, 2021).



**Figura 13.** Posibles extracciones de vapor en el circuito secundario de un reactor nuclear para obtener vapor de diferentes características (Fuente: elaboración propia).

del combustible y de la temperatura requerida por el proceso de cogeneración (IAEA, 2017b).

Como se observa en la figura 12, las aplicaciones de cogeneración de los reactores nucleares se encuentran sujetas a la temperatura que son capaces de alcanzar (IAEA, 2020). Nos encontramos con que los reactores de agua ligera pueden emplearse como apoyo a la calefacción de agua de distrito o a la desalinización. Sin embargo, otras aplicaciones de ámbito más industrial como la producción de hidrógeno necesitan temperaturas más elevadas que se corresponden mayoritariamente al rango de aplicación de los reactores de Generación IV que funcionan a mayor temperatura y que, por tanto, invitan a introducir características de este tipo de reactores avanzados a la escala *SMR*.

Sabiendo que las aplicaciones consideradas para la cogeneración demandan unas condiciones distintas de presión y temperatura, parece lógico que las extracciones de vapor del ciclo se deben dar en distintos puntos (The Royal Society, 2020). En la figura 13 se encuentra esquematizado un reactor tipo PWR y sus puntos de extracción de vapor. Se consideran aplicaciones de baja temperatura (de 100 a 200 °C) para las que se emplean las condiciones de salida de turbina, aprovechando así el calor residual que en otras circunstancias se evacuaría en el condensador, perdiéndose y condenando la eficiencia del ciclo. Algunos ejemplos de estas aplicaciones serían la calefacción de distrito y la desalinización. Debido a que las condiciones necesarias para estas plantas de cogeneración se alcanzan en los reactores de agua ligera, son las aplicaciones con mayor experiencia operativa acumulada en todo el mundo y encontramos en la literatura numerosos casos (IAEA, 2009). Además, nos proporcionan los ejemplos de ciclos con mayores incrementos de eficiencia de aprovechamiento térmico.

Los reactores convencionales refrigerados por agua han sido tradicionalmente los más empleados como fuente de calor para la calefacción de agua de distrito, sin embargo, la instalación de *SMRs* ofrece distintas ventajas frente a los grandes reactores. Gracias a los estándares de calidad que cumplen y a su reducido tamaño, la construcción se puede realizar más cerca del núcleo de la población, reduciendo tanto los costes como las pérdidas térmicas asociadas al transporte. Además, debido a la disminución del tiempo de

construcción, se abre la posibilidad de cubrir la demanda con menores periodos de planificación.

## 6.2. Producción de hidrógeno

Uno de los procesos que está adquiriendo más relevancia a nivel mundial es la producción de hidrógeno (The Royal Society, 2020). La energía nuclear puede dar soporte a este proceso mediante dos vías: empleo del calor en ciclos termoquímicos, o empleo de calor y electricidad en procesos de electrólisis (Yildiz y Kazimi, 2006). La tecnología con mayor desarrollo en la producción de hidrógeno mediante procesos termoquímicos es el reformado con vapor. Este proceso, pese a ser el más económico, genera considerables cantidades de  $\text{CO}_2$ . También existen procesos de separación de agua, que gracias al bajo coste del agua y la no producción de  $\text{CO}_2$  tienen mayores beneficios, estos procesos tienen un gran potencial de aplicación comercial.

Para aplicaciones que requieran mayor temperatura de proceso como la producción de hidrógeno (IAEA, 2017a), se requiere intercambiar calor antes de la turbina, donde se produce la reducción de presión y temperatura. Además, en la mayoría de estos casos, las temperaturas se alcanzan en reactores de Generación IV, donde el ciclo termodinámico principal no es un ciclo de Rankine. Es el caso de la industria petroquímica, de papelera o de la generación de hidrógeno.

En la actualidad, países como Reino Unido apuestan por la producción de hidrógeno basada en energía nuclear. Si a principios de 2021 el *Nuclear Industry Council (NIC)* estimaba que hasta un tercio de la producción de hidrógeno podría tener origen nuclear en 2050 (Nuclear Industry Council, 2021), aproximadamente 75 TWh producidos con entre 12 y 13 GWe nucleares mediante electrólisis y reformado de vapor, en agosto de 2021, Boris Johnson anunciaba que, en 2030, Reino Unido ya contaría con 5 GWe nucleares para la producción de hidrógeno.

## 6.3. Zonas remotas de difícil acceso

Los *SMR* concebidos para suministrar energía a zonas remotas ya son una realidad, y en este caso, Rusia es



**Figura 14.** La primera central nuclear flotante de la historia, *Akademik Lomonosov* (Fuente: Rosatom).

pionera con su central nuclear flotante *Akademik Lomonosov* (figura 14). Esta central se encuentra en operación desde mayo de 2020 con el objetivo de suministrar energía a la red de Chukotka, en el extremo nordeste de Rusia, en la costa del mar de Bering. Este distrito tiene alrededor de 50.000 habitantes que viven dispersos entre varias aldeas, y posee grandes reservas de petróleo, gas natural, carbón, oro y tungsteno, por lo que su población vive de la minería principalmente y, además, tiene una red eléctrica aislada que sirve a toda la región.

Esta central nuclear flotante consta de dos reactores SMR de modelo KLT-40S de diseño PWR, con una potencia eléctrica de más de 35 MWe cada uno, y con una vida de diseño de 40 años. El reactor KLT-40S utiliza uranio enriquecido hasta un 20 % para obtener ciclos de operación de hasta 3 años (*Akademik Lomonosov Floating NPP, Pevek, Chukotka, Russia*, 2020). El núcleo del reactor mide 1,22 m de diámetro y 1,22 m de altura, y consta de 121 elementos combustibles. El *Akademik Lomonosov* es un proyecto piloto que nació en 2007 y que supone el comienzo de un proyecto más grande, que comprenderá toda una flota de centrales nucleares flotantes destinadas a suministrar energía a las poblaciones aisladas y a campos de extracción de recursos energéticos como gas y petróleo off-shore. Reactores más avanzados de su clase son los diseños RITM-200, también de diseño PWR integrado, y que desde octubre de 2020 propulsan el rompehielos *Arktika*, con hasta cuatro proyectos similares en marcha que se pondrán en funcionamiento entre 2022 y 2026. Uno de los avances más importantes de los reactores RITM-200 respecto del KLT-40S es, además de su diseño integrado, una vida de diseño de hasta 60 años y ciclos de operación que se extienden desde los 3 a los 10 años, dependiendo del modelo, por lo que se minimiza la indisponibilidad del reactor por las maniobras de recarga.

#### 6.4. Exploración espacial

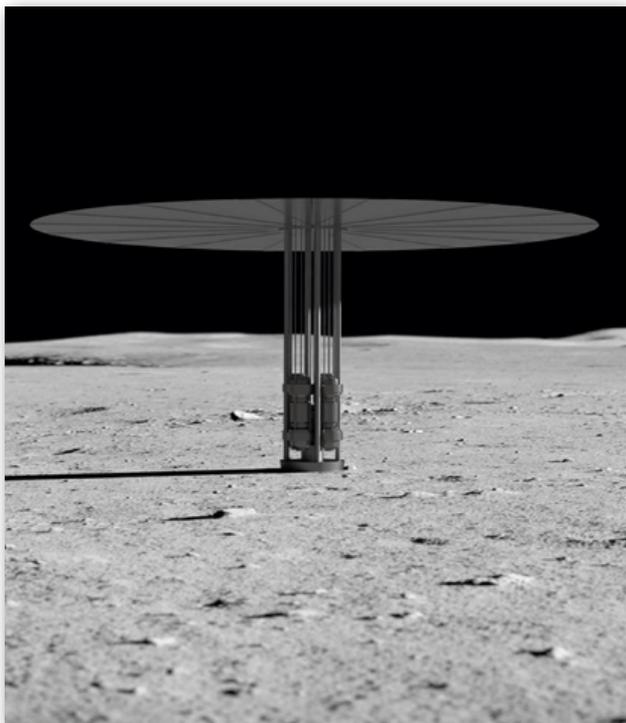
La aplicación de los SMR en la exploración espacial ya es una de las propuestas de la oficina para el comercio

espacial de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) en una orden ejecutiva sobre los SMR aplicados a la defensa y al espacio (*Executive Order on Small Modular Reactors for Defense and Space – Office of Space Commerce*, 2021). Esta orden ejecutiva tiene el propósito de revitalizar el programa de exploración espacial de Estados Unidos desarrollando diferentes opciones de suministro energético para satisfacer las necesidades de defensa. Utilizar tecnología SMR permitiría a Estados Unidos mantener su liderazgo tecnológico a la vez que postula una opción de exploración sostenible en la Luna y Marte entre otras localizaciones. Estos SMR se fabricarían en la Tierra y serían llevados a los emplazamientos seleccionados para ser operados de forma remota. La propia NASA ya ha calificado como difícil de conseguir, si no imposible, su meta de establecer una base lunar sin contar con la energía nuclear. Estas bases que tomarían suministro de energía nuclear podrían estar habitadas por astronautas o servir como estaciones de exploración remotas en diferentes lugares del sistema solar, aunque las aplicaciones de los SMR no se limitarían solo al suministro de energía *in situ* en las bases proyectadas, sino que también se extenderían a retomar los diseños de reactores nucleares para la propulsión nuclear (Brown, 2022).

Utilizar energía nuclear en la propulsión espacial puede aumentar considerablemente el aprovechamiento al reducir hasta un 25 % los tiempos de viaje en comparación con los sistemas de propulsión química (*6 Things You Should Know About Nuclear Thermal Propulsion*, 2021). La aplicación de la energía nuclear en la propulsión espacial no es algo nuevo, de hecho, en 1965 la NASA puso en órbita su reactor SNAP-10A como parte del *SNAPSHOT program* (SNAP-10, -10A and SNAPSHOT – *Beyond NERVA*, s. f.), siendo el primer reactor nuclear en ser colocado en órbita que probó el funcionamiento de la tecnología de propulsión iónica de aeronaves, aunque dejó de funcionar poco más de un mes después debido a un fallo del sistema eléctrico no relacionado con la parte nuclear de la instalación.

Actualmente, la NASA lleva a cabo varios programas que estudian diferentes opciones de propulsión nuclear. El programa Kilopower es un proyecto experimental lanzado por la NASA y el DOE (*Department of Energy*) en 2017, que tiene por objetivo el diseño de un reactor nuclear que genere entre 1 y 10 kWe de potencia eléctrica, utilizando para este propósito un motor lineal Stirling que alimente el generador eléctrico de la aeronave. El generador eléctrico sometería una corriente de Xe a una diferencia de potencial lo suficientemente elevada como para ionizar el xenón y generar un plasma que puede ser acelerado para propulsar la aeronave. Estos diseños inicialmente contemplaban el empleo de uranio enriquecido al 93 %, aunque examinan las ventajas de utilizar enriquecimientos más reducidos, que, aunque aumenten el peso de la aeronave debido a la mayor masa del combustible, tamaño y blindajes de neutrones y radiación gamma necesarios para proteger a la tripulación, son un material más accesible por los centros de investigación. Otra opción desde el punto de vista de la propulsión nuclear es la propulsión térmica (Houts *et al.*, 2014), basada en el funcionamiento del reactor desde un punto de vista más convencional y menos sofisticado, aprovechando la energía térmica producida para calentar el hidrógeno almacenado en un tanque y generar así el empuje necesario para propulsar la aeronave. Este sistema tiene como ventajas respecto a la propulsión eléctrica que aligera el peso de la aeronave y genera un mayor empuje. Sin embargo, la gestión del propelente es más complicada al tratarse de hidrógeno.

Uno de los avances más recientes en este campo ha sido la demostración del funcionamiento de un nuevo tipo de reactor nuclear en el marco del programa Kilopower mencionado anteriormente, que permitirá misiones tripuladas de larga duración a la Luna y a Marte, en un experimento llevado a cabo en el Nevada National



**Figura 15.** Recreación artística del concepto de reactor nuclear con aplicación espacial en la superficie lunar (Fuente: NASA).

Security Site en 2017 (Potter, 2018). El diseño probado (figura 15), suministraría 10 kWe de potencia eléctrica durante 10 años. Según sus cálculos, cuatro reactores de este tipo podrían abastecer una base habitada en la luna, donde la generación de energía con paneles solares, por ejemplo, no es posible debido a la duración de las noches lunares de hasta 14 días.

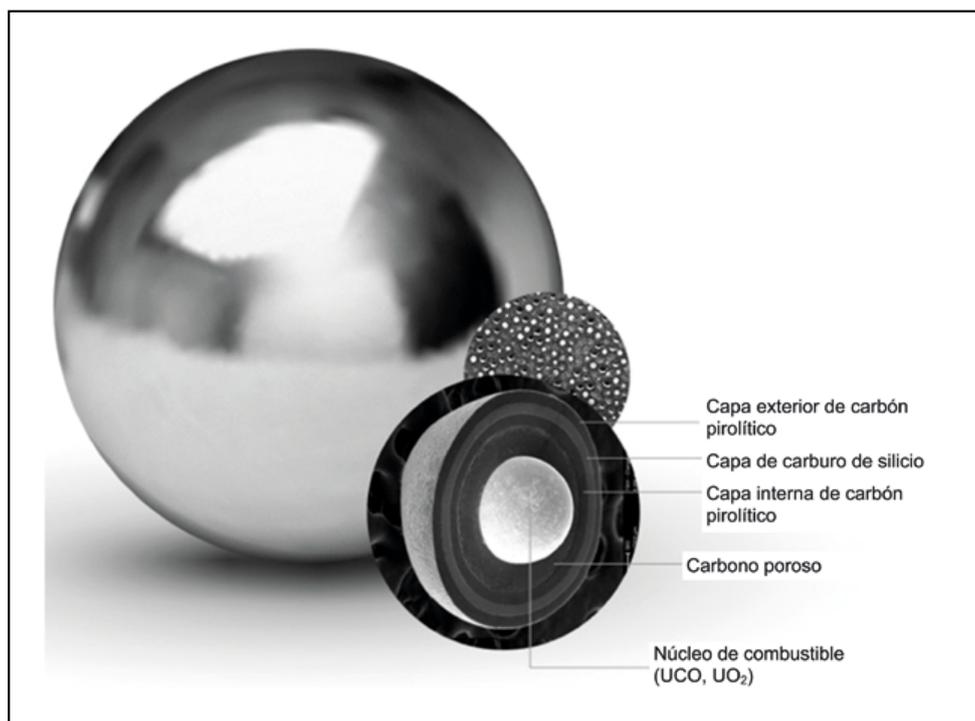
## 7. REACTORES SMR AVANZADOS

Como ya se ha comentado anteriormente, alrededor de 70 diseños distintos de SMR se encuentran bajo consideración actualmente (IAEA, 2020). Se puede encontrar una amplia variedad en cuanto a las tecnologías propuestas para estos diseños, destacando que prácticamente la mitad son SMR refrigerados por agua. Estos diseños adoptan, por tanto, una tecnología madura con gran recorrido operacional y, de hecho, varios de ellos se encuentran en fases avanzadas de su diseño e implementación. No obstante, surgen nuevas líneas de desarrollo basadas en otras tecnologías como pueden ser los reactores refrigerados por gas a alta temperatura, los reactores de espectro neutrónico rápido o los reactores de sales fundidas. En general, estas tecnologías avanzadas se encuentran en una fase más preliminar de su diseño y se espera que jueguen un papel relevante a más largo plazo. En este apartado se destacan los aspectos más interesantes de cada una de estas líneas de desarrollo con el objetivo de aportar una visión más general sobre el futuro de los SMR.

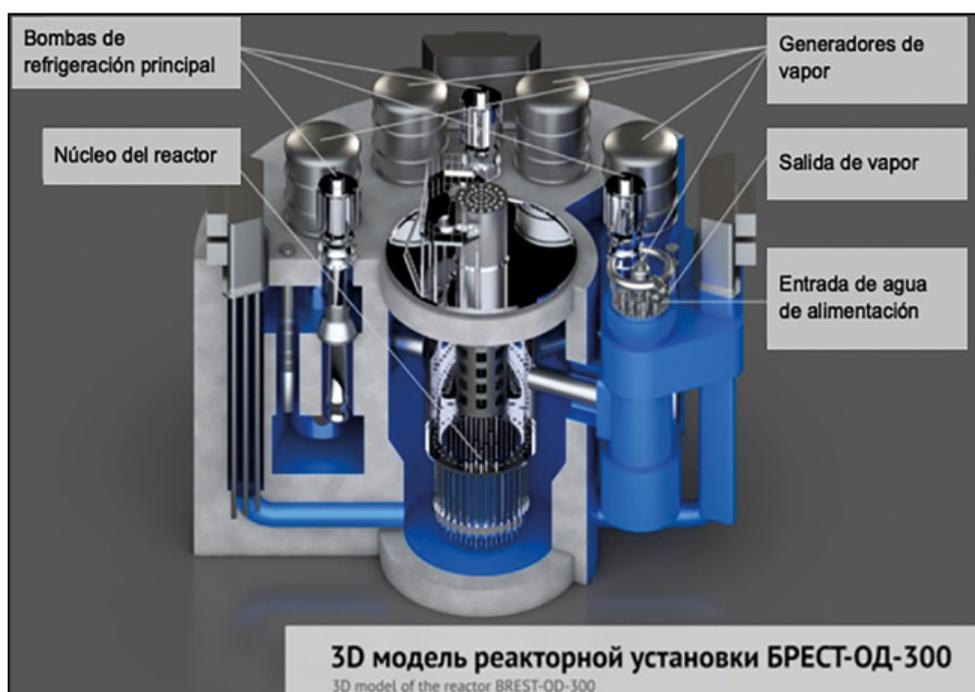
### 7.1. Reactores refrigerados por gas a alta temperatura

Los reactores refrigerados por gas a alta temperatura o *High Temperature Gas Cooled Reactors (HTGR)* son de gran interés gracias a la gran variedad de aplicaciones a las que dan acceso. Considerando que proporcionan calor de proceso a temperaturas por encima de los 750 °C, estos reactores se pueden emplear para una producción eléctrica más eficiente, así como para distintas aplicaciones industriales como la producción de hidrógeno o la desalinización. Es importante indicar que pese a incluir esta tecnología entre los diseños SMR avanzados, hay actualmente varios reactores de este tipo en operación, destacando el HTR-PM, construido en China y en operación desde 2021. Así mismo, una notable experiencia operativa rodea a esta tecnología en su vertiente de grandes reactores en países como Sudáfrica o Reino Unido.

Estos reactores están refrigerados generalmente por helio y moderados por grafito, encontrando el combustible en forma de elementos esféricos recubiertos. Este tipo de combustible, en su variante más extendida, se conoce como *TRISO (TRi-structural ISOtopic particle fuel)*. En este diseño, una esfera o *pebble* de combustible contiene en su interior gran cantidad de esferas de óxido de uranio, recubiertas de diferentes capas (figura 16) con distintas funciones, como el almacenamiento de los productos de fisión o la aportación de integridad estructural al combustible. Esta tecnología aporta grandes ventajas en términos de la seguridad inherente del sistema, debido principalmente a las altas temperaturas que puede soportar el combustible y al almacenamiento individual de los productos de fisión en cada una de las esferas.



**Figura 16.** Visión de la composición de combustible *TRISO* (*Media Kit (Triso-X)* — *X-Energy*, 2021).



**Figura 17.** Esquema de distribución del circuito primario del reactor *BEST-OD-300* (Fuente: Rosatom).

## 7.2. Reactores de espectro neutrónico rápido refrigerados por metales fundidos

Los reactores de espectro neutrónico rápido también llevan captando la atención de la industria durante décadas gracias a las ventajas que aportan en cuanto a los ciclos de combustible a los que puede accederse con ellos. Son reactores refrigerados por metales fundidos como el sodio, el plomo o el plomo-bismuto. Con la utilización de estos refrigerantes, el reactor cuenta con un espectro neutrónico rápido, es decir, el sistema opera con neutrones mucho más energéticos en comparación con los diseños tradicionales *LWR*. Con este aspecto técnico, la utilización

del combustible es notablemente más sostenible dado que se puede acceder a todo el potencial del combustible nuclear reduciendo sustancialmente la radiotoxicidad del combustible gastado. Es por ello por lo que muchos países han dedicado esfuerzos al desarrollo de esta tecnología, que aporta también una considerable experiencia operativa incluyendo reactores de potencia comercial.

Una docena de *SMRs* de espectro rápido han sido propuestos, aunque la mayoría de ellos están en su fase inicial de diseño. Rusia y Estados Unidos son los principales países involucrados en el desarrollo de esta tecnología, destacando el diseño ruso *BREST-OD-300* de la figura 17, cuya operación está prevista para 2026. Estos diseños están

planteados para cerrar el ciclo de combustible, recibiendo combustible quemado en reactores *LWR* que se puede reproducir en plutonio gracias a la utilización del espectro rápido. No obstante, su viabilidad técnica y económica está aún por determinar, por lo que aquellos reactores que se introduzcan en un futuro cercano tendrán que actuar como demostradores de esta tecnología.

### 7.3. Reactores refrigerados por sales fundidas

Gran atención está recibiendo en los últimos años los reactores refrigerados por sales fundidas. Esta tecnología no cuenta con una experiencia operativa que los avale, pero se presenta como una variante muy prometedora gracias sobre todo a sus ventajas desde el punto de vista de la seguridad. Estos reactores suponen un cambio radical en su funcionamiento puesto que el combustible, en fase líquida, está mezclado y circula por el sistema mezclado con el refrigerante, las sales fundidas. Partiendo desde aquí ya se puede observar una ventaja notable dado que no hay riesgo de fusión del combustible puesto que ya está en fase líquida. Por tanto, la integridad de la vasija no está en riesgo y no hay posibilidad de liberación de productos de fisión.

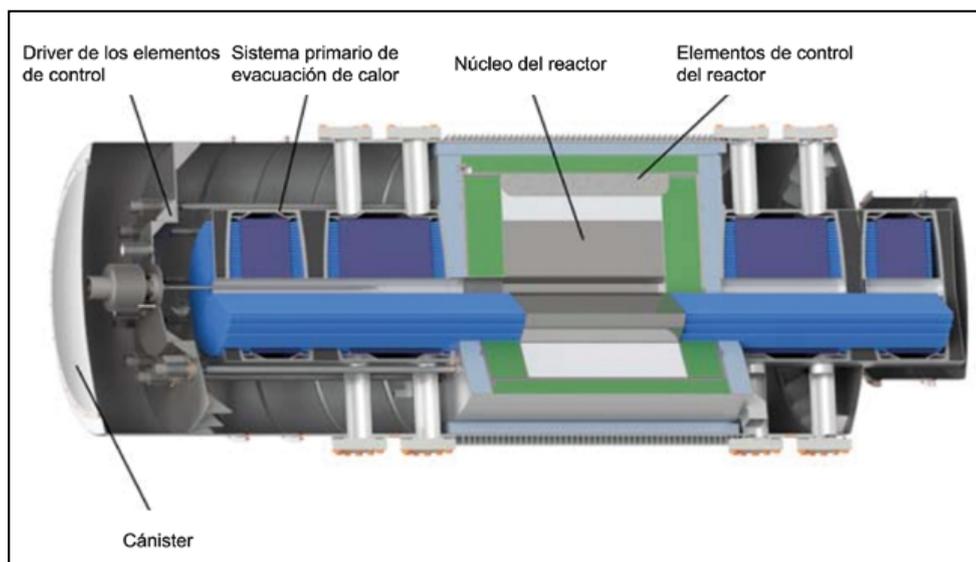
Esta tecnología también recibe gran interés debido a que se presenta como el complemento definitivo para acceder al ciclo de torio. Es por ello por lo que prácticamente todos los diseños de *SMRs* refrigerados por sales fundidas cuentan con un combustible que incluye torio. Estados Unidos es el país que más diseños basados en esta tecnología está estudiando. No obstante, es importante incidir en que prácticamente todos estos diseños se encuentran en

fases de diseño muy preliminares y se presentan, por tanto, como una alternativa muy prometedora a largo plazo.

### 7.4. Micro-reactores

Recientemente ha surgido una variante de *SMRs* muy interesante por los bajos rangos de potencia eléctrica que contempla, desde 1,5 a 10 MWe. Estos diseños se enmarcan en una categoría denominada micro-reactores y surgen para alimentar sistemas eléctricos pequeños de regiones aisladas o también para cubrir las necesidades de industria o minería. Así mismo pueden ser también reactores transportables dedicados a resolver necesidades estacionales. No se pueden calificar como una tecnología en sí dado que los diseños incluidos en esta categoría pueden ser muy variados, desde *HTGR* hasta reactores refrigerados por sales fundidas. Es por ello por lo que se puede encontrar una amplia variedad de combustibles o refrigerantes en estos micro-reactores. Por tanto, las características técnicas y retos a superar de cada diseño dependerán directamente de la tecnología escogida y el refrigerante empleado.

De nuevo, Estados Unidos acoge el desarrollo de gran parte de estos diseños, donde destaca el reactor eVinci de Westinghouse (figura 18). Esta propuesta surge desde los diseños utilizados para exploración espacial y se intenta reconvertir en un reactor transportable para producción tanto de calor como de electricidad. Las grandes ventajas para el desarrollo de los micro-reactores son la accesibilidad económica dado que son de 100 a 1000 veces más pequeños que un reactor nuclear convencional además de la posibilidad de una rápida construcción y puesta en marcha.



**Figura 18.** Esquema de los componentes de reactor eVinci de Westinghouse (Fuente: Westinghouse Electric Company).

## 8. CONCLUSIONES

Los *SMR* van a suponer una revolución en el sector energético y nuclear por diferentes razones. Sus diseños mejoran muchos aspectos que potencian el crecimiento de la energía nuclear en el mundo, como su respuesta ante accidentes, su menor potencial de contaminación en caso de liberación de material radiactivo debido a su inventario

reducido en comparación con los grandes reactores, o su mayor capacidad para realizar el seguimiento de carga, característica esencial de un *mix* eléctrico de gran componente renovable.

Otro aspecto esencial es su versatilidad para adaptarse a diferentes entornos, como islas energéticas o incluso polígonos industriales potenciando la eficiencia de la red de transporte eléctrico motivada por la generación

distribuida. Los pequeños reactores modulares son una tecnología emergente en un contexto de transición energética que necesita la ayuda de todas las herramientas disponibles para conseguir sus objetivos de descarbonizar el sistema energético mundial. Sin embargo, durante los próximos años tienen que demostrar que son capaces de hacerlo de una forma eficiente, adaptándose al cambio rápido de una estructura de generación más renovable y demostrando su viabilidad económica.

Otro gran esfuerzo que se realiza de forma paralela es la adaptación de los organismos reguladores en materia de seguridad nuclear, que también tienen que desarrollar y adaptar nuevos criterios de seguridad a las características de este tipo de reactores con todo el esfuerzo de investigación y simulación que conlleva. Las perspectivas y los análisis económicos que han realizado varias instituciones internacionales vaticinan un éxito para el sector. Sin embargo, en un entorno cambiante, será necesario satisfacer diferentes necesidades además de la producción de energía eléctrica, como la producción de hidrógeno como vector energético y el suministro de calor de forma variable en el tiempo, lo cual supone un nuevo reto en la operación de estos reactores.

Por otro lado, debido a su reducido tamaño, a la mejora en sus características de seguridad y a la reducción de los costes de inversión inicial, estos reactores pueden impulsar el desarrollo de muchos países que en la actualidad se encuentran en vías de desarrollo, y que gozan de infraestructuras eléctricas modestas para hacer crecer sus economías utilizando sistemas de producción energética de bajas emisiones de CO<sub>2</sub>.

Tras hacer un breve repaso de sus aplicaciones no destinadas a la producción de energía eléctrica convencional, es probable que en los próximos años ocurra un gran avance en esta dirección, en la que los sistemas de generación nuclear se postulan como la única opción que posibilita la exploración espacial para establecer bases (habitadas o no) en otros planetas, donde la intensidad de la luz solar o la propia demanda de estas bases imposibilitan utilizar el recurso solar. Ante este panorama, disponer la tecnología adecuada podría resultar determinante en la carrera por disponer de los recursos minerales que se encuentren en otros planetas de forma rentable. Actualmente se ha disparado la cantidad de *start-ups* que lideran proyectos de reactores modulares pequeños para satisfacer otro tipo de demanda energética, constituida principalmente por la necesidad del calor de proceso, en la que empresas de nueva creación ponen sus ojos en diferentes sectores industriales, como por ejemplo, en la industria farmacéutica, como público objetivo de sus nuevos diseños de reactores SMR, y que ya ha manifestado interés en este tipo de tecnología.

En definitiva, la tecnología SMR se postula como una tecnología más versátil, segura, barata y eficiente en términos de aprovechamiento del recurso energético y de los recursos minerales necesarios para producir energía no relacionados con el combustible. Como consecuencia de las diferentes aplicaciones que se proponen para este tipo de reactores, de forma simultánea o no a la producción eléctrica civil, es conveniente llevar a cabo inversiones en investigación y desarrollo que nos permitan beneficiarnos de esta tecnología a nivel industrial y a nivel usuario cuando así sea compatible con el interés de las empresas y de la sociedad.

Es necesario poner de relieve la importancia de la investigación en este campo, que se encuentra en su fase de despegue, sin subestimar su potencial crecimiento, sobre todo apuntando hacia las aplicaciones en las que no existe una tecnología alternativa, como en el sector aeroespacial, y sin dejar de lado los aspectos positivos de la energía nuclear y la importancia de una estrategia adecuada y responsable de la gestión de los residuos radiactivos. Tanto las aplicaciones de la tecnología nuclear, como la solución a cuestiones que son de especial relevancia en el debate social, tales como la gestión de los residuos y la viabilidad económica, necesitan de mayor inversión en I+D para lograr desarrollar fuentes de energía más accesibles, sostenibles y menos perjudiciales para el medio ambiente.

## 9. REFERENCIAS

Beyond Nerva (s. f.). SNAP-10,-10A and SNAPSHOT. <https://beyondnerva.com/fission-power-systems/systems-for-nuclear-auxiliary-power-snap/snap-10-10a-and-snapshot/>

Black, G.A., Aydogan, F., y Koerner, C.L. (2019). Economic viability of light water small modular nuclear reactors: General methodology and vendor data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 103, pp. 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.041>

British Petroleum (2021). Statistical Review of World Energy. N° 70. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>

Brown, D.W. (2022). NASA's NuclearOption May Be Crucial for Getting Humans to Mars. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/nasas-nuclear-option-may-be-crucial-for-getting-humans-to-mars/>

Cummins, W.E., y Matzie, R. (2018). Design evolution of PWRs: Shippingport to generation III+. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 102, pp. 9-37. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.08.008>

Di Giulio, M. (2015). Severe Accident Simulation of Small Modular Reactors. Disertación Tesis Doctoral. Bolonia: Universidad de Bolonia. <https://doi.org/10.6092/UNIBO/AMSDOTTORATO/7079>

EPRI (1986). Designing the Advanced LWR. *EPRI JOURNAL*, 11. <http://eprijournal.com/wp-content/uploads/2016/01/1986-Journal-No.-5.pdf>

Houts, M.G., et al (2014). The Nuclear Cryogenic Propulsion Stage. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, OH, 28-30 July, 2014. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3724>

IAEA (2009). Non-electric applications of nuclear power: Seawater desalination, hydrogen production and other industrial applications. *Proceedings of an International Conference, Oarai, Japan, 16-19 April 2007*. <https://www.iaea.org/publications/7979/non-electric-applications-of-nuclear-power-seawater-desalination-hydrogen-production-and-other-industrial-applications>

IAEA (2017a). Industrial Applications of Nuclear Energy. N° NP-T-4.3. Viena: IAEA. <https://www.iaea.org/publications/10877/opportunities-for-cogeneration-with-nuclear-energy>

IAEA (2017b). Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy. N° NP-T-4.1. Viena: IAEA. <https://www.iaea.org/publications/10877/opportunities-for-cogeneration-with-nuclear-energy>

IAEA (2020). Advances in Small Modular Reactors and Technology Developments. Viena: IAEA.

IAEA-PRIS (2022). Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series, N° 2. Viena: IAEA. <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>

IEA (2020). Projected Costs of Generating Electricity. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

Ingersoll, D.T., *et al* (2014). NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water. *Desalination*, Vol. 340, pp. 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.023>

IPCC (2021). Summary for Policymakers. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA, pp. 3–32. doi:10.1017/9781009157896.001.

Masson-Delmotte, V., *et al* (2018). Summary for Policymakers. En: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 32). World Meteorological Organization. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>

MITERD (2021). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>

NASA (2018). Demonstration Proves Nuclear Fission Can Provide Exploration Power. <http://www.nasa.gov/press-release/demonstration-proves-nuclear-fission-system-can-provide-space-exploration-power>

NS Energy (2020). Akademik Lomonosov Floating Nuclear Power Plant. <https://www.nsenergybusiness.com/projects/akademik-lomonosov-floating-npp/>

Nuclear Industry Association (NIA) (2021). Forty by '50: The Nuclear Roadmap. <https://www.niauk.org/forty-by50-the-nuclear-roadmap/>

NuScale-LLC (2020). Featured Topic: Cost Competitive. <https://www.nuscalepower.com/newsletter/nucleus-spring-2020/featured-topic-cost-competitive>

Office of Nuclear Energy (2021). 6 Things You Should Know About Nuclear Thermal Propulsion. <https://www.energy.gov/ne/articles/6-things-you-should-know-about-nuclear-thermal-propulsion>

Office of Space Commerce (2021). Executive Order on Small Modular Reactors for Defense and Space. <https://www.space.commerce.gov/executive-order-on-small-modular-reactors-for-space-missions/>

Pacce, M., Sánchez, I., y Suárez-Varela, M. (2021). Recent developments in Spanish retail electricity prices: The role played by the cost of CO2 emission allowances and higher gas prices. *Documentos Ocasionales*, n° 2120. Madrid: Banco de España.

Red Eléctrica Española (2022). Red Eléctrica al Día. <https://www.ree.es/es/datos/aldia>

Ritchie, H., y Roser, M. (2020). CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

SENDECO2 (2021). Sistema europeo de negociación de CO2. <https://www.sendeco2.com/es/>

Solan, D., *et al* (2010). Economic and Employment Impacts of Small Modular Nuclear Reactors. Idaho Falls, ID/EE UU: The Energy Policy Institute.

The Royal Society (2020). Nuclear cogeneration: Civil nuclear energy in a low-carbon future. Policy briefing. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/nuclear-cogeneration/2020-10-7-nuclear-cogeneration-policy-briefing.pdf>

World Nuclear Association (2021a). Plans for New Nuclear Reactors Worldwide. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>

World Nuclear Association (2021b). Nuclear Process Heat for Industry. <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-process-heat-for-industry.aspx>

X-energy (2021). Media Kit (Triso-X) — X-Energy: HTGR | Nuclear Reactors (SMR) & TRISO Fuel. <https://x-energy.com/media/triso-x>

Yildiz, B., y Kazimi, M.S. (2006). Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(1): pp. 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.02.009>