

REACTORES MODULARES HORIZONTE 2030



ÁNGEL PEINADO PÉREZ

Soporte técnico – Servicio Técnico Nuclear
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR

INTRODUCCIÓN

Durante la presente década, dentro del panorama energético mundial, va a tener lugar el despliegue de los Reactores Nucleares Modulares Pequeños o SMR (*Small Modular Reactor*), impulsados por las políticas a nivel mundial de transición a una economía baja en CO₂ que tienen como ambicioso objetivo conseguir en 2050 la neutralidad en emisiones (*Net Zero Strategy*).

Ante este panorama, países como Reino Unido, Francia, Estados Unidos y Canadá están haciendo importantes inversiones para incentivar a la industria nuclear en el desarrollo y licenciamiento de varios diseños, cuyo principal objetivo es tener una fuente de energía segura, flexible, económica y limpia que se integre con las energías renovables en el cumplimiento de los objetivos medioambientales.

Los nuevos SMR están rompiendo los mitos y estigmas de la energía nuclear, presentándose como una fuente de energía fiable, intrínsecamente segura y competitiva tanto en plazos como en costes.

DEFINICIÓN DE UN REACTOR MODULAR PEQUEÑO

Los Reactores Nucleares Modulares Pequeños o SMR (*Small Modular Reactor*) son reactores cuya potencia eléctrica está comprendida entre los 2 y los 300 MWe. Los más pequeños, también llamados microrreactores, tienen una potencia comprendida entre los 5-20 MW térmicos y en algunos diseños su reactor es tan compacto que tiene el volumen de un contenedor marítimo de 40 pies (12 metros longitud). Estos microrreactores tienen su aplicación en el suministro de energía eléctrica o calorífica en regiones re-

motas (por ejemplo, en Canadá) para la sustitución de grupos generadores diésel.

Se habla de centrales o reactores “modulares” debido a que la fabricación está planteada de una manera estandarizada para la mayor parte de los componentes del reactor y sistemas asociados (en forma de módulos), realizándose en su totalidad en fábrica y haciendo posible su envío al emplazamiento ya completos y listos para su ensamblaje.

Otra de sus características es que son escalables, es decir, pueden instalarse en un mismo emplazamiento varios de estos reactores e ir poniéndolos en operación progresivamente para comenzar a obtener un retorno de la inversión desde los primeros años del proyecto global.

Actualmente hay más de 70 diseños de SMR y microrreactores en distintas fases de desarrollo. Entre ellos, hay entre 10-15 diseños que se encuentran suficientemente desarrollados como para haber presentado un licenciamiento de su diseño a los reguladores nacionales, sobre todo en Estados Unidos y Canadá. Por ejemplo, NuScale recibió en 2020 la aprobación de la licencia de su diseño en EE.UU.

En occidente, los primeros reactores estarán operativos en fase de demostración en 2026-2027 y en fase comercial a finales de la presente década. Cabe mencionar que Rusia y China encabezan la carrera con dos diseños en operación que son los precursores de los SMR. Rusia puso en servicio en 2020 la primera central nuclear flotante del mundo (*Akademik Lomonosov*) consistente en una barcaza con dos reactores modulares de diseño ruso Rosatom, de 35 MWe cada uno. El objetivo en el futuro próximo es llevar estas centrales flotantes para sustituir sus centrales nucleares (C.N. Bilibino) y térmicas antiguas, ubicadas en lugares remotos.



Foto 1. Akademik Lomonosov.

Fuente: <https://www.bbc.com/news/world-europe-49446235>

En China, en 2021, se puso en funcionamiento el HTR-10 que es considerado el primer SMR terrestre. Se trata de un reactor de gas a alta temperatura (*High Temperature Gas Reactor*, HTGR) de 200 MWe refrigerado por helio.

TIPOS DE REACTORES MODULARES

Hay fundamentalmente 4 tipos de reactores nucleares modulares: reactores de agua ligera, reactores de gas a alta temperatura, reactores de sales fundidas y reactores refrigerados por metales líquidos. A grandes rasgos estas son las principales características de su funcionamiento:

Reactores de agua ligera

Esta tecnología es la versión reducida y modular de los reactores de agua a presión (PWR) y agua en ebullición (BWR) que hay actualmente en occidente con una configuración de elementos combustibles y barras de control similares. El fluido principal es el agua que se usa como moderador (reducir la energía de los neutrones) y de refrigerante del reactor.

La principal novedad de los nuevos diseños modulares es que tanto el reactor, los generadores de vapor (en caso de reactor de agua a presión), los sistemas de suministro de agua y vapor nuclear e incluso la contención, se encuentran albergados en un único componente. Las dimensiones de dicho recipiente permiten que puedan ser montados en fábrica y transportados al emplazamiento de la central (p.ej., NuScale de 18 m longitud y 3 m diámetro) minimizando la necesidad de tuberías que unan los distintos equipos. La mayoría de estos diseños están basados en la circulación natural del agua a través de los componentes, por lo que se evita también la necesidad de bombas en los sistemas nucleares.

Entre los diseños de este tipo se encuentran NuScale, BWRX-300 de GE-Hitachi y el UK-SMR de Rolls Royce.

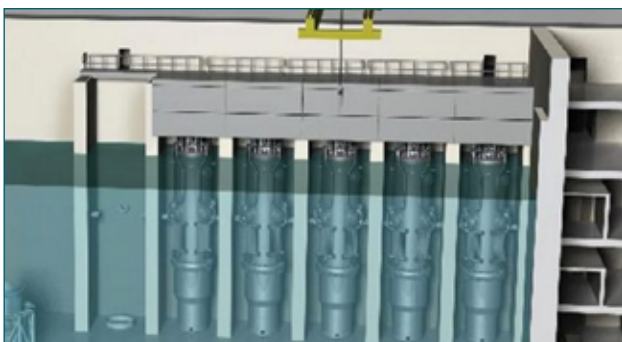


Foto 2. BWRX-300 (Reactor agua ligera)

Fuente: [BWRX-300 \(gepower.com\)](https://www.gepower.com)



Foto 3. NuScale (Reactor de agua ligera). Fuente: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Romania-to-explore-NuScale-SMR-deployment>

Reactores de gas a alta temperatura

Los reactores de gases a alta temperatura (HTGR, *High Temperature Gas Reactor*) usan grafito como moderador y helio como fluido refrigerante. El combustible son pequeñas bolas de óxido de uranio en una matriz de grafito, que pueden ser insertadas alimentadas al reactor y extraídas de manera continua en operación, sin necesidad de que las plantas tengan que parar para reemplazar su combustible. Dicho combustible presenta grandes ventajas intrínsecas de seguridad, puesto que es estable a temperaturas mucho más altas que los combustibles convencionales de reactores de agua ligera, dando margen a los sistemas de seguridad para su actuación.

Otra ventaja es la alta temperatura del fluido refrigerante (600-700 °C) que permite obtener un rendimiento energético elevado (45 %), y además permite un aprovechamiento del calor de distintas maneras: producción de vapor/eléctrica en turbina y usos en cogeneración en procesos industriales diversos (generación hidrógeno, industrias químicas, cerámicas, etc).

Hay dos tipos de módulos en su fabricación, el reactor en sí donde se insertan las bolas de combustible y que tiene las barreras de grafito y el módulo del generador de vapor usando el helio.



Foto 4. Xe-100 Reactor gas alta temperatura.

Fuente: <https://x-energy.com/reactors/xe-100>

Reactores de sales fundidas (Molten Salt Reactors)

La principal característica de estos reactores es que usan un único fluido como combustible y refrigerante, que son sales fundidas con contenido en uranio. Dicho combustible circula por un único recipiente/módulo donde se produce la reacción nuclear y que alberga a la propia vasija, cambiadores de calor y bombas que mueven el fluido. Estas sales con combustible intercambian calor con otras sales "limpias" que se llevan el calor del recipiente/módulo para que pueda ser usado en generación de energía (a través de otro intercambiador sales/agua), cogeneración o almacenamiento de energía en forma de calor, ya que las sales es un fluido muy adecuado para tal propósito.

El combustible en forma de sales fundidas es probablemente el más robusto frente a un accidente, ya que las sales son estables a muy altas temperaturas y el calor de decaimiento del reactor no llegaría a producir en ningún momento productos de fisión volátiles. Otra ventaja es que todo el proceso de intercambio de calor se produce a presión atmosférica, evitando la necesidad de componentes nucleares a presión.

Normalmente, los recipientes principales se reemplazan por completo por uno nuevo cada 7-10 años dependiendo del diseño, lo cual no supone ningún problema debido al carácter modular de la planta.

Reactores refrigerados por metales líquidos

Estos reactores rápidos usan sodio como refrigerante, y como en el caso de Natrium de Terrapower, pueden ir asociados a un sistema de sales fundidas para usarlo como almacenamiento de calor. Usan uranio natural no enriquecido como combustible y promete un uso 30 veces más eficiente desde el punto de vista del combustible, con respecto a los reactores de agua ligera.

Estos reactores operan a presión atmosférica, al igual que los reactores de sales fundidas, lo que es una ventaja operativa. Una de sus aplicaciones más prometedoras es que son capaces de usar como combustible los residuos radioactivos de alta actividad (actínidos y plutonio), maximizando la producción de energía a partir del material fisil contenido en el combustible y reduciendo la huella de residuos producida.

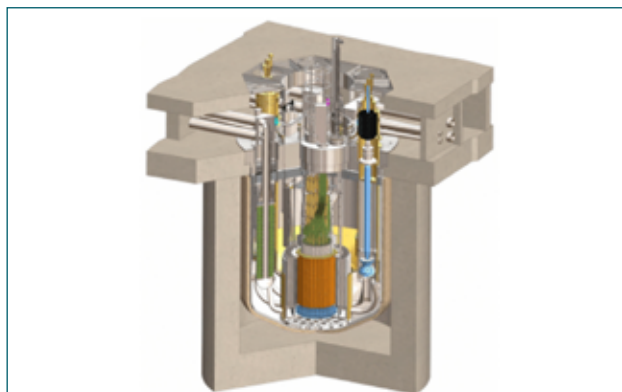


Foto 5. Reactor Natrium. Fuente: <https://www.energynews.es/natrium-el-nuevo-reactor-nuclear-de-la-compania-de-bill-gates/>

Microrreactores

Los microrreactores presentan una de las soluciones más versátiles y serán probablemente los reactores modulares que primero verán la luz, sobre todo para su utilización en zonas remotas. El rango de potencia generada está entre 5-10 MWe y su operación está pensada para 8-10 años sin necesidad de recargar el combustible.

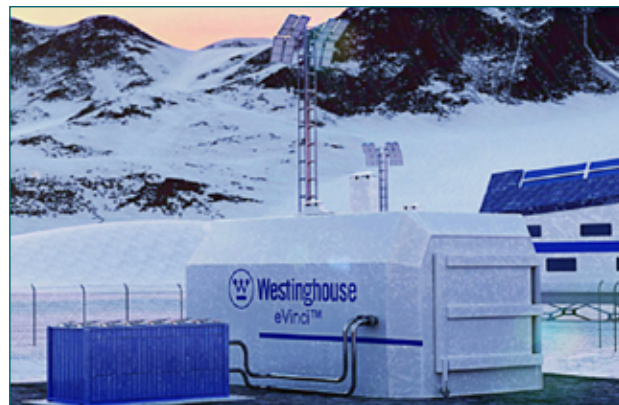


Foto 6. eVinci Westinghouse. Fuente: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/licensing-activities/pre-application-activities/evinci.html>

A su vez, se pueden clasificar en función de la tecnología que usan: gas a alta temperatura o metales líquidos.

Se prevé que los primeros microrreactores estén operativos en 2026, siendo los diseños que están más avanzados eVinci (Westinghouse), Ubattery (Urenco) y Micro Modular Reactor (MMR, UltraSafe Corporation).

SEGURIDAD

Los diseños de reactores modulares tienen en común importantes mejoras en la seguridad, incluso algunos se consideran intrínsecamente seguros. Algunas de las características en este aspecto son:

- Tienen diseños simplificados, con menos componentes necesarios para la refrigeración del reactor, siendo la mayoría de los sistemas de seguridad pasivos. Por ejemplo, muchos diseños no necesitan componentes activos para el movimiento del fluido refrigerante (bombas), sino que se produce por convección natural.
- Permiten la parada segura del reactor sin la intervención activa de ningún sistema u operador.
- La menor potencia térmica de estos reactores significa menos calor residual a evacuar y menor reactividad a gestionar durante un posible accidente.
- Combustibles más robustos: en los reactores de agua ligera actuales la primera barrera frente a un daño al núcleo son las vainas de combustible, que se degradan a partir de los 1000 °C. Los nuevos combustibles usados (Pebble, molten salt fuel, etc) son estables a temperaturas mucho más altas, permitiendo que haya más margen para que se puedan refrigerar.
- Al ser más pequeños, muchos reactores estarán ubicados en cotas inferiores a las del terreno (enterrados), lo que presenta ventajas frente a sismo y en la gestión de accidentes.

RETOS

Los principales retos a los que tienen que hacer frente los reactores modulares durante la próxima década son:

- Encontrar suficiente soporte de los gobiernos desde el punto de vista político, financiero y de licenciamiento, en todas las fases de proyecto desde el diseño a la construcción de los primeros prototipos. En algunos países se está haciendo una fuerte apuesta para que los primeros prototipos estén disponibles a final de esta década, sobre todo en Estados Unidos y Canadá.
- Se requerirá un profundo desarrollo tecnológico de los primeros modelos (reactores de demostración) para demostrar su viabilidad técnica, así como sus mejoras en la seguridad.
- Será imprescindible que sean económicamente competitivos con las tecnologías renovables, tanto en el coste del kW instalado (CAPEX) como en el kWh producido (LCOE). Los reactores deberán ser flexibles y deberán responder a las necesidades de la red eléctrica adaptándose a la producción flexible en un modelo futuro con una gran penetración de las energías renovables. Las instalaciones de almacenamiento energético adyacentes a las centrales (por ejemplo, sales fundidas) puede ser uno de los puntos clave para aumentar la competitividad económica.
- Conseguir una cadena de suministro adecuada para conseguir una producción en serie de los componentes y módulos, todo ello a un precio que permita un coste final competitivo (fabricación modular de componentes). La utilización de componentes de grado comercial, en vez de equipos relacionados con la seguridad, incrementará previsiblemente las opciones disponibles en la cadena de suministro y reducirá los tiempos de aprobación del regulador.
- Mejoras en el proceso de licenciamiento que permitan que dicho proceso sea ágil y no demore los plazos de puesta en servicio de los primeros reactores (con el consecuente impacto económico).

APOYOS DE LOS GOBIERNOS A LOS PLANES DE DESARROLLO DE LOS SMR

Estos son los principales planes de los distintos países para el desarrollo de los reactores modulares en occidente:

- Reino Unido, dentro de su plan *Ten Point for a Green Industrial Revolution* y en *2020 Energy White Paper*, ha confirmado su compromiso en el desarrollo tanto de grandes reactores como de reactores avanzados y modulares, destacando el papel de la energía nuclear en la transición para conseguir el *Net Zero*. Este soporte incluye inversiones y fondos de 200 millones de libras para el desarrollo de reactores modulares.
- Canadá, dentro de sus programas *SMR Roadmap* y *SMR Action Plan*, ha preparado un sólido plan para que se lleven a cabo proyectos de reactores nucleares más pequeños, sencillos y baratos. Hay distintas inversiones millonarias en varias tecnologías para la construcción de prototipos de los diseños Integral Molten Salt Reactor, Westinghouse eVinci, Moltex Stable Salt Reactor, BWRX-300 de GE-Hitachi y ARC-100.
- En este contexto, en diciembre de 2021, la eléctrica canadiense OPG anunció la adjudicación a GE-Hitachi del primer BWR-X300 para su emplazamiento de Darlington, el cual se espera que esté en operación comercial en 2028.
- Estados Unidos, a través del Departamento de Energía (DOE) está apoyando a diez diseños de reactores avanzados a madurar y demostrar sus tecnologías. Además, dicho departamento aporta fondos de cientos de millones de dólares para el desarrollo de varios reactores avanzados.
- Francia está apoyando firmemente los SMR como tecnología para reemplazar en el futuro a las plantas de carbón y gas natural y ha anunciado un plan de inversión de 1000 millones de euros para el desarrollo del reactor modular Nuward y que esté operativo en el año 2030.

CONCLUSIÓN

Impulsados por las políticas a nivel mundial de transición a una economía baja en CO₂ que tienen como ambicioso objetivo conseguir en 2050 la neutralidad en emisiones (*Net Zero Strategy*), los reactores modulares se presentan como una fuente de energía fiable que puede ser el complemento perfecto a la producción creciente de energía renovable.

La mayoría de los principales países de occidente están haciendo inversiones para el desarrollo de dichos reactores y conseguir que se conviertan en realidad durante la presente década.■