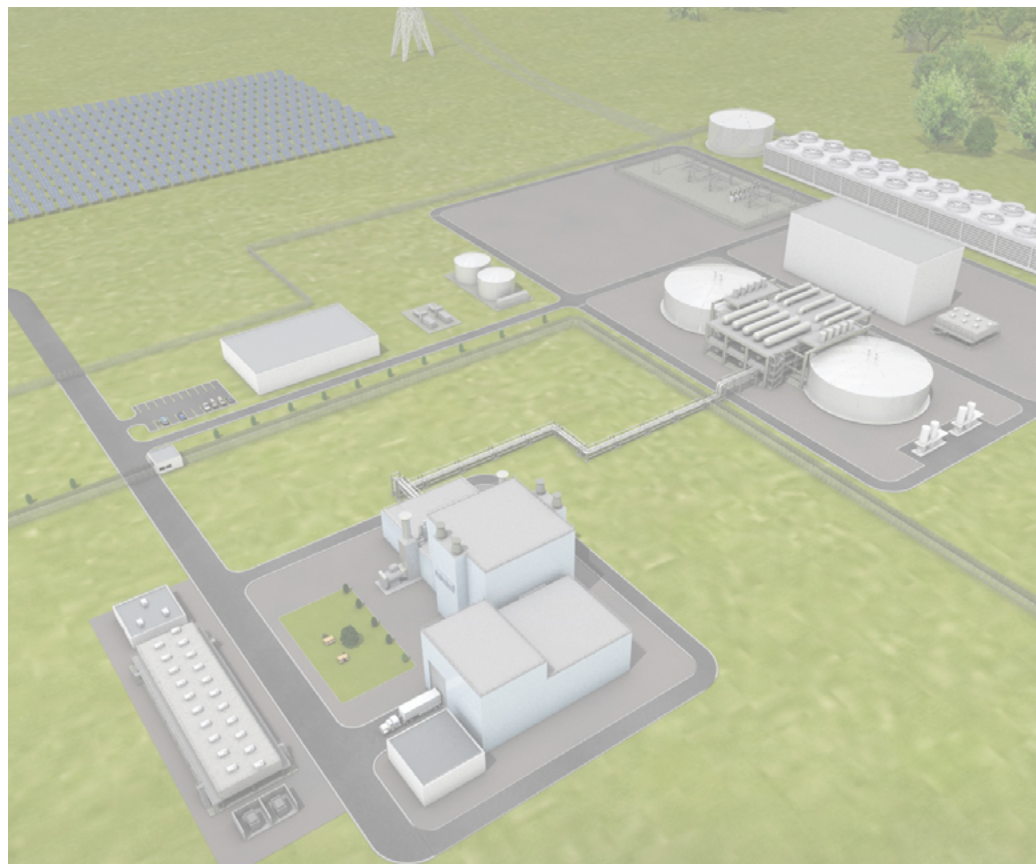


Reactores Modulares Pequeños

Small Modular Reactors (SMRs)



Representación esquemática de un SMR Natrium
Fuente: TerraPower

La innovación es la fuerza motora para un continuo desarrollo de la tecnología nuclear, que conduce a nuevos diseños de reactores con capacidades superiores a las de los actuales y aplicaciones más diversas añadidas a la de generación de electricidad: producción de calor industrial a alta temperatura, calefacción, hidrógeno y desalación del agua del mar.

El gran atractivo tecnológico de la fisión nuclear es su elevada densidad de energía: la fisión de 1 g de U-235 libera unos 24,5 MWh, energía equivalente a la de la combustión de 2,7 t de carbón o 2,1 t de petróleo. Esta liberación de energía tiene lugar sin emisión de CO₂, lo que ayuda al cumplimiento de los objetivos medioambientales.

Es estratégico preservar y desarrollar tecnologías punteras propias de la energía nuclear, lo que ejerce un importante efecto tractor sobre diversos sectores económicos, al tiempo que refuerza la independencia energética. De forma conjunta con las energías renovables, evita una mayor dependencia de los combustibles fósiles.

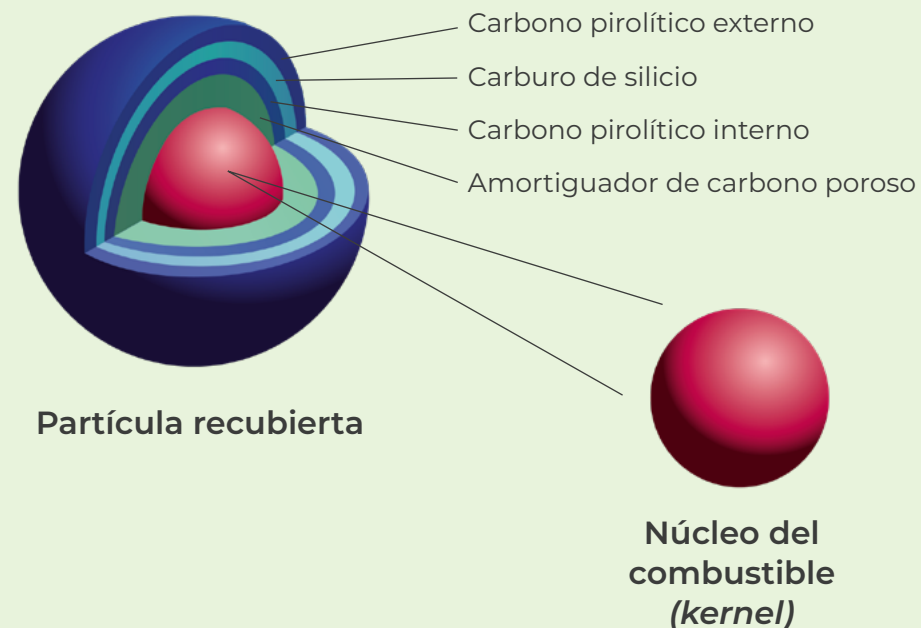
El interés por el desarrollo de los Reactores Modulares Pequeños se remonta a la década de 2010

A principios de la década de 2010, dentro del programa *International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycle* (INPRO) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) de Naciones Unidas y como iniciativa del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos, **se comenzó el desarrollo de una nueva familia de reactores nucleares denominados Reactores Modulares Pequeños o de Pequeña Potencia** (*Small Modular Reactors – SMR*), con potencias eléctricas unitarias no superiores a 300 MWe y posible entrada en servicio a lo largo de las próximas dos décadas.

Según estimaciones de la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE, un despliegue rápido de los reactores SMR podría resultar en evitar la emisión de 15.000 millones de toneladas de CO₂ desde ahora hasta el año 2050. Como comparación, en 2021 las emisiones mundiales de CO₂ fueron superiores a los 33.000 millones de toneladas.

Optimización del combustible nuclear

El ciclo de combustible nuclear, basado en la experiencia adquirida con el reactor de muy alta temperatura (*Very High Temperature Reactor - VHTR*), utiliza partículas muy pequeñas de uranio, carbono y oxígeno que constituyen el núcleo del combustible (*kernel*). Se encapsulan con tres capas de carbono y material cerámico -lo cual las hace extremadamente resistentes a transitorios operacionales- integrándose en una matriz de grafito. Técnicamente se conocen como partículas de combustible tri-estructural isotrópico y se las denomina TRISO. Se pueden fabricar en forma de cápsula cilíndrica o de pequeñas bolas esféricas (*pebbles*).



La estructura del núcleo consiste en bloques de grafito, dispuestos como un prisma -como en el reactor japonés HTTR (*High Temperature Engineering Test Reactor*)- o en forma de lecho de esferas (*pebble bed*) -como en el reactor chino HTR-10 (*High Tempera-*

ture Gas-Cooled Reactor - Pebble-bed Module)-, refrigerados por helio. La baja densidad de potencia del diseño del núcleo del reactor facilita la utilización de sistemas pasivos de eliminación del calor latente de desintegración.

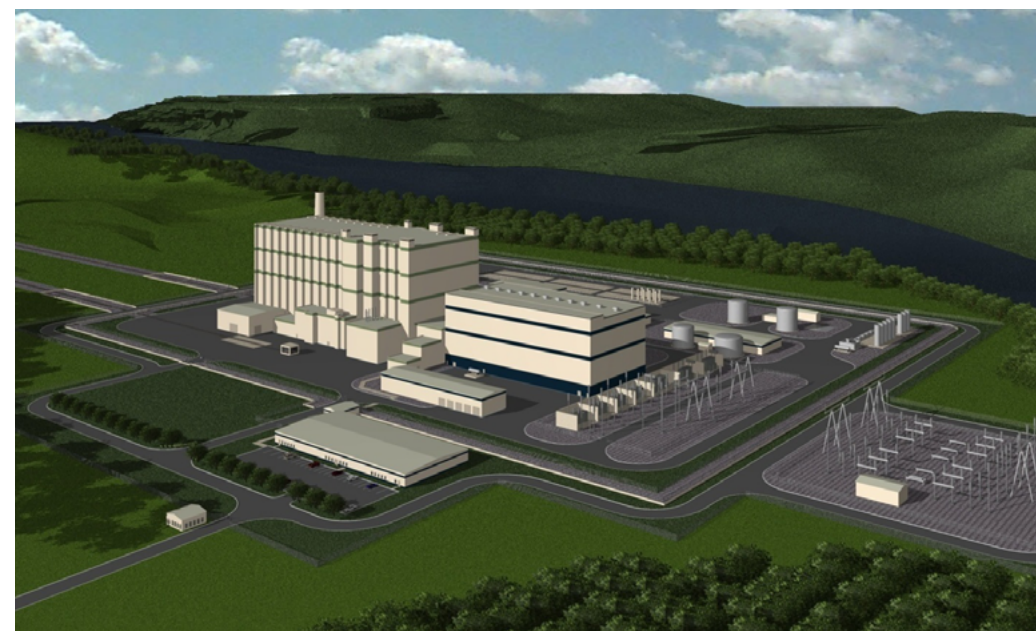
Reactores Modulares Pequeños

La industria tiene un gran interés en producir electricidad, vapor de proceso e hidrógeno mediante centrales nucleares de diseño modular y pequeña potencia unitaria, motivado por el deseo de reducir los costes de inversión directa, simplificar el licenciamiento y los períodos de construcción y hacer posible que las unidades puedan estar alejadas de las grandes redes de transporte.

Los Reactores Modulares Pequeños o SMRs tienen la ventaja de una menor necesidad de capital en la inversión inicial, su escalabilidad y la flexibilidad en la elección de los emplazamientos, en particular áreas remotas, en los que no sea posible construir reactores tradicionales más grandes.

Un factor adicional que impulsa el desarrollo de Reactores Modulares Pequeños es que, debido a las pequeñas potencias que se consideran y a su carácter modular, **es posible producirlos en fábrica con todas las ventajas que esto conlleva en cuanto a calidad de fabricación, facilidad de licenciamiento y estandarización**, con lo cual se enviarían al emplazamiento ya completas y listas para alcanzar la potencia deseada añadiendo módulos adicionales, que podrían recargarse y mantenerse independientemente.

Los SMRs simplifican el diseño y se producen en fábrica, por lo que se ahorra en costes y tiempo, y tienen seguridad inherente



Representación esquemática de una central equipada con un SMR Natrium
Fuente: TerraPower

En general, **los proyectos de los SMR se basan en la simplicidad de diseño, la producción en fábrica con la economía de escala asociada, ahorros de costes y tiempo** y la eliminación de errores y cambios durante la instalación en el emplazamiento, **al tiempo que presentan un alto nivel de seguridad inherente y utilización de medios pasivos**, como la gravedad para accionar los sistemas de seguridad o la convección para la transmisión y evacuación de calor. Algunos de ellos están igualmente diseñados para instalación total o parcial subterránea, con el objeto de reducir el riesgo de ataques terroristas. Otra ventaja es su menor necesidad de refrigeración, lo cual es importante desde el punto de vista de optimizar los recursos hídricos.

Varios fabricantes y los organismos reguladores de distintos países ya han iniciado el proceso de licenciamiento genérico, incluso en fábrica, antes de enviar el reactor completo al emplazamiento, a fin de verificar la certificación del diseño y los procesos de autorizaciones de construcción y operación.

Aspectos básicos comunes a los diseños de los SMR

• Modularidad

Se refiere a la capacidad de completar el sistema replicando módulos unitarios y producir una gran parte de los componentes del sistema de generación de vapor nuclear (NSSS) en fábrica -con las ventajas que conlleva en cuanto a calidad de fabricación, facilidad de licenciamiento y estandarización-, lo que permite enviar los conjuntos al emplazamiento ya completos y listos para alcanzar la potencia deseada añadiendo unidades modulares y ensamblando la salida del vapor u otro fluido activo al ciclo turbina-generator, con una reducción sustancial de los tiempos de construcción y sus costes inherentes.

• Reducción de costes

Los componentes modulares y su fabricación estandarizada pueden reducir la duración y los costes de su construcción.

• Menor necesidad de capital en la inversión inicial

Debido a los costes de capital inferiores, los costes de inversión son menores en comparación a los de los grandes reactores.

• Flexibilidad en la elección del emplazamiento

Pueden proporcionar electricidad para aplicaciones en las que no se necesiten grandes unidades o en emplazamientos que carezcan de la infraestructura necesaria. Pueden ser recomendables para mercados eléctricos pequeños, zonas aisladas, redes pequeñas, emplazamientos con superficie y/o refrigeración limitada.

• Aumento de eficiencia

Pueden acoplarse con otras fuentes de energía, incluyendo renovables y térmicas fósiles, para compatibilizar los recursos y obtener mayores rendimientos y diversos productos energéticos finales, al tiempo que se incrementan la estabilidad y la seguridad de las redes.

• Diversidad de aplicaciones

Algunos de los diseños podrán producir calor de proceso a alta temperatura para su aplicación directa en diversos procesos industriales: cogeneración, desalación de agua del mar, producción de hidrógeno e hibridación.

SMR

Reactores Modulares Pequeños en fase avanzada de diseño

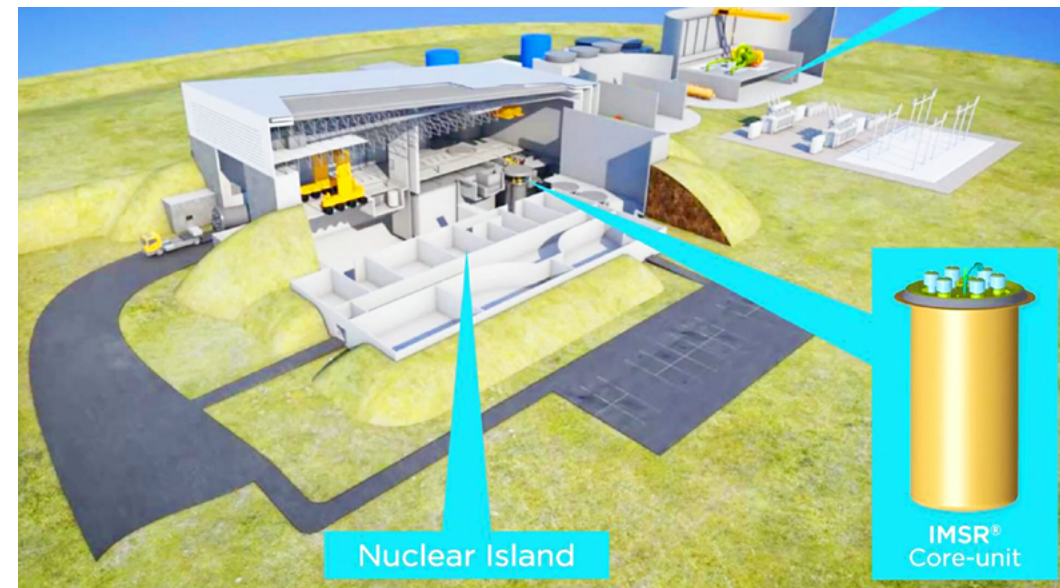
Actualmente existen más de 70 diseños diferentes de SMRs en distintas etapas de desarrollo, con características diferentes según su aplicación y propósito de uso. A continuación, se muestran varios ejemplos en fase avanzada de diseño.

En la actualidad existen más de 70 diseños diferentes de Reactores Modulares Pequeños

Canadá

Canadá ha puesto en marcha un plan, COG – SMR, para el desarrollo, demostración y despliegue de **Reactores Modulares Pequeños para múltiples aplicaciones**, para lo que ha formado un grupo con las empresas participantes en el programa nuclear canadiense de reactores convencionales (*Canadian Owners Group - COG*) que, junto con instituciones gubernamentales, comparten riesgos y beneficios tecnológicos y económicos dentro del denominado *Canada's SMR Action Plan* que incluye también al Gobierno Federal, las provincias y las comunidades locales, con el objetivo de implicar al máximo a la sociedad civil.

El programa COG - SMR pretende realizar una revisión del proceso regulador en Canadá; el desarrollo de documentos sobre seguridad física de las instalaciones, responsabilidad civil, etc.; el análisis de mercados para los SMR y el apoyo a las estrategias de penetración en los mismos; y las consideraciones relativas al suministro



Esquema del *Integral Molten Salt Reactor (IMSR)*
Fuente: Terrestrial Energy

tro de combustible y a la gestión del combustible usado y los residuos radiactivos.

La compañía Terrestrial Energy está desarrollando el *Integral Molten Salt Reactor (IMSR)*, un diseño conceptual de SMR basado en la utilización

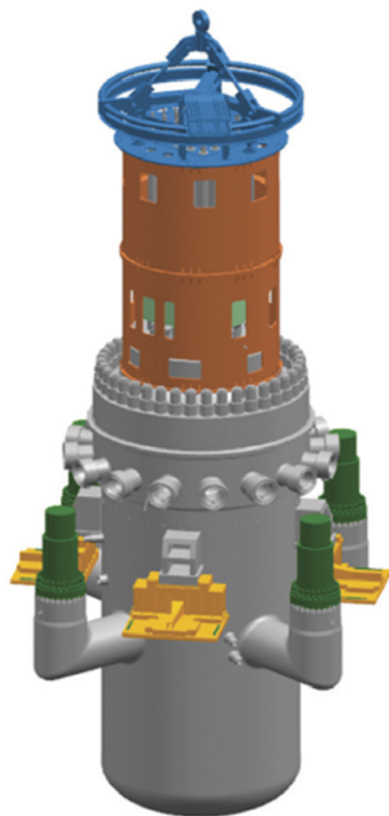
de sales fundidas para su refrigeración que **no solamente servirá para la producción de electricidad, sino también de calor de alta temperatura para su utilización en otras aplicaciones industriales.**

China

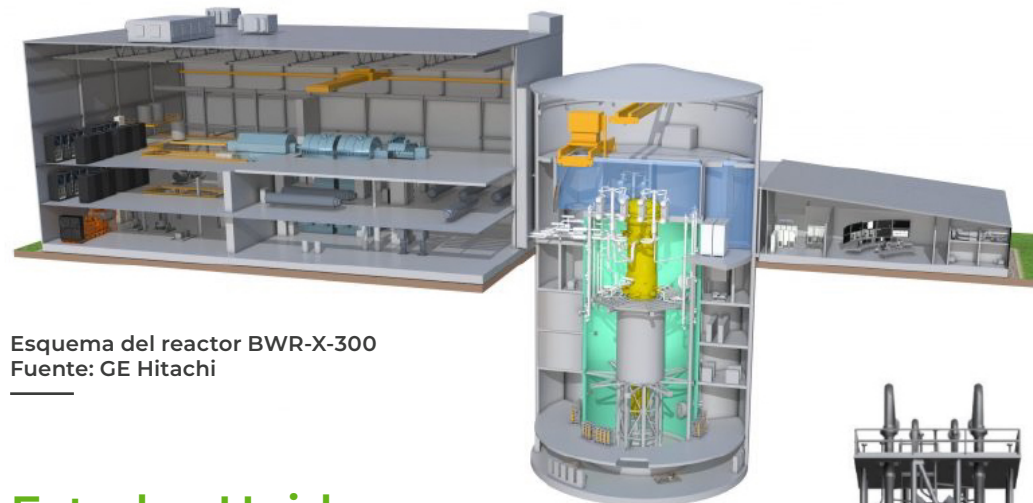
China, el país que más unidades nucleares construye actualmente en el mundo, también está desarrollando un ambicioso programa de Reactores Modulares Pequeños. Tras la obtención de las correspondientes autorizaciones de las autoridades reguladoras y administrativas, **en julio de 2021 dio comienzo la construcción de un reactor de demostración de diseño ACP-100**, en Changjiang en la provincia de Hainan. Este reactor de agua a presión de 125 MWe -también denominado Clase Linglong- se ha diseñado para la producción de electricidad, vapor industrial y desalación de agua de mar, así como para alimentar redes de calor y frío y la producción de hidrógeno. Está prevista su entrada en servicio en mayo de 2025.

Este diseño utiliza 57 elementos combustibles y se basa en la tecnología del reactor ACP-1000. Incorpora sistemas de seguridad pasiva, así como generadores de vapor integrales, y su instalación puede ser subterránea.

China, que apuesta firmemente por la energía nuclear, desarrolla también un ambicioso programa de Reactores Modulares Pequeños



Detalle del reactor ACP-100
Fuente: China Nuclear National Corporation

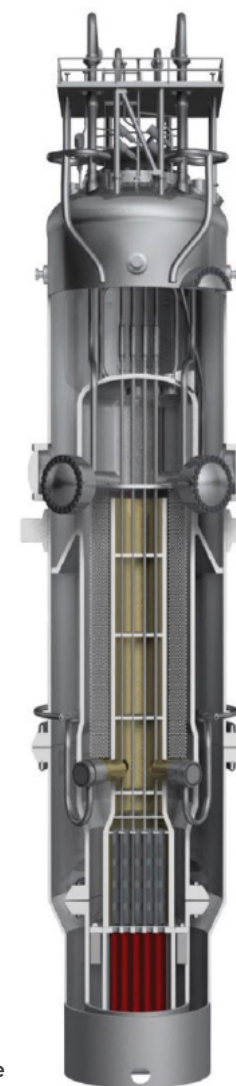


Esquema del reactor BWR-X-300
Fuente: GE Hitachi

Estados Unidos

El reactor BWR-X-300 de General Electric Hitachi (GEH) se basa en la experiencia evolutiva de sus distintos diseños de reactores de agua en ebullición. Resultan en una vasija muy compacta que se puede preparar en fábrica, con una potencia de 300 MWe.

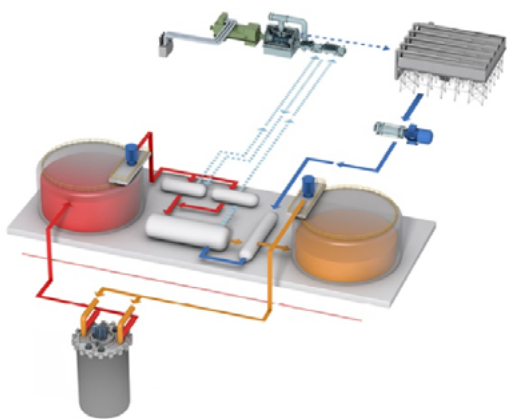
El reactor de la empresa NuScale se basa en módulos de 60 MW, con unas dimensiones de 23 m x 5 m, que dentro de una vasija de presión contienen el reactor, el generador de vapor y el presionador. Este módulo va sumergido en una piscina con agua. Los factores de seguridad pasivos incluyen circulación de refrigerante por convección que permite una refrigeración indefinida sin acción del operador ni dependencia de la alimentación exterior o reposición de agua exterior.



Reactor SMR de NuScale
Fuente: NuScale

El reactor Natrium -iniciativa conjunta de TerraPower, compañía estadounidense fundada por Bill Gates en 2006, y GE Hitachi Nuclear Energy- representa un nuevo concepto para la generación y el almacenamiento de energía, hibridando un reactor rápido refrigerado por sodio con un sistema de almacenamiento de sales fundidas.

Simplifica los tipos de reactores hasta ahora existentes, ya que todos los equipos no nucleares -mecánicos, eléctricos y otros- se emplazan en edificios separados, lo que reduce la complejidad de la instalación y su coste. Además, la mayor parte de los componentes de la planta se fabricarán según los estándares in-



Disposición esquemática de un SMR Natrium
Fuente: TerraPower



Representación esquemática de la central de Kemmerer, equipada con un SMR Natrium
Fuente: TerraPower

dustriales y se reducirá en un 80%, respecto a los grandes reactores actuales, el hormigón de clase nuclear necesario.

Por otra parte, el reactor -del tipo de onda de propagación (*Travelling Wave Reactor* - TWR)- utiliza uranio empobrecido o uranio natural como combustible y tiene una potencia de 345 MWe. El innovador sistema de almacenamiento térmico será capaz de aumentar la potencia de salida hasta 500 MWe con una gran flexibilidad de operación y seguimiento de carga durante más de cinco horas y media, lo que permite su integración en sistemas y mercados con una importante penetración de producción eléctrica de origen renovable.

Una primera unidad dispondrá de permiso de construcción en agosto de 2023, estando prevista la puesta en servicio antes de 2030. El emplazamiento

elegido es una central de carbón que se va a retirar del servicio, en Kemmerer (Wyoming, Estados Unidos).

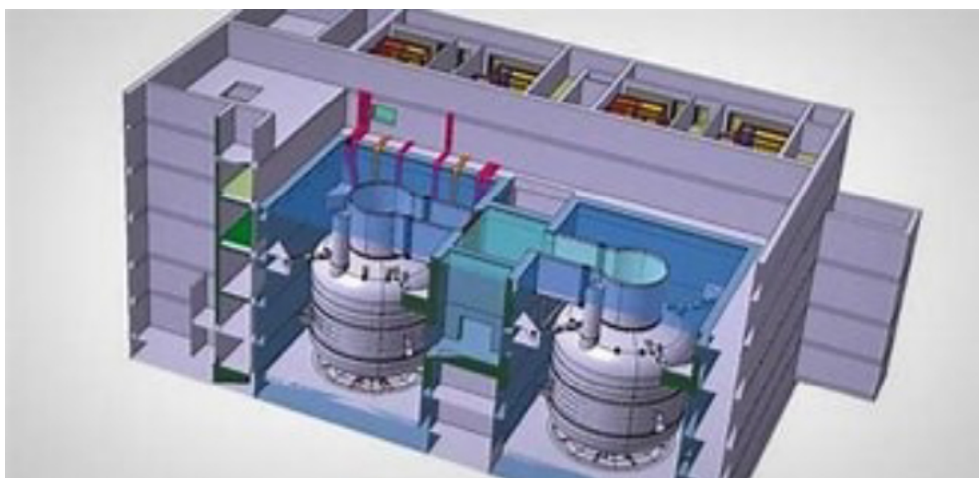
Por su parte, el diseño de Westinghouse es un reactor de agua a presión cuyo módulo básico tiene una potencia térmica de 800 MWt equivalentes a una potencia eléctrica de 225 MWe, que integra todos los siste-



Diseño conceptual de una central con reactores SMR de Westinghouse
Fuente: Westinghouse

mas del circuito primario dentro de la vasija de presión. Utiliza sistemas de seguridad pasivos -que permiten la parada automática del reactor y la eliminación del calor residual- y componentes probados en el diseño y construcción de reactores avanzados AP-1000 para reducir el número de equipos, incrementar al máximo la seguridad y acortar el proceso de licenciamiento.

Otras características básicas son la necesidad de menor cantidad de combustible, lo que reduce el inventario de radiactividad; la posibilidad de enterrar la contención para aumentar la protección física y radiológica; y el poder hacer seguimiento de carga de modo flexible.

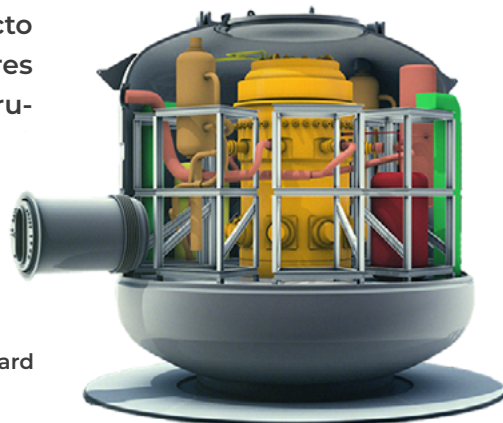


Módulo del reactor Nuward y su edificio de contención
Fuente: CEA

Francia

El Presidente Emmanuel Macron anunció en noviembre de 2021 el plan “France 2030”, que incluye importantes asignaciones presupuestarias dedicadas al desarrollo de nueva potencia nuclear. De esta forma, **Francia ha intensificado su participación en el proyecto Nuward, consistente en reactores de 170 MWe que se pueden agru-**

par en bloques. La compañía eléctrica estatal EDF lidera en este proyecto a un consorcio de empresas al que presta su apoyo tecnológico el Commissariat à l’Énergie Atomique (CEA).



Reactor Nuward
Fuente: CEA

Reino Unido

La imagen muestra el **diseño de Rolls Royce en una instalación semienterrada.** Se basa en módulos de 220 MW que se pueden acoplar para los niveles de potencia deseados y reducirían a menos de cinco años el período de construcción. El reactor es tan compacto (16 m de largo y 4 m de diámetro) que se puede transportar por camión, tren o incluso barcazas.



Imagen conceptual del SMR semienterrado de Rolls Royce
Fuente: Rolls Royce



Representación conceptual del transporte de un reactor SMR por camión
Fuente: Rolls Royce

Reactores Modulares Pequeños en operación

China

La compañía China Huaneng Group anunció a finales del año 2021 la primera criticidad y conexión a la red de un reactor del tipo HTR-10, configurado sobre una base cerámica refrigerada por helio y de 200 MWe de potencia eléctrica, que utiliza este combustible y es modular. Está situado en la central nuclear de Shidao Bay, en la provincia de Shandong, en el nordeste de China, y es el primer reactor SMR terrestre en el mundo.

Este reactor combina características de los reactores HTR de alta temperatura y de los modulares pequeños. Al estar refrigerado por helio no depende del agua de refrigeración y, por tanto, se puede instalar en ubicaciones en las que no exista disponibilidad de agua para estos efectos.



Emplazamiento del reactor HTR-10 en la central de Shidao Bay
Fuente: Tsinghua University



Akademic Lomonosov, primera central nuclear flotante del mundo
Fuente: Rosatom

Rusia

Como ejemplo de reactor SMR ya en funcionamiento y con respecto a aplicaciones en lugares remotos, en mayo de 2020 se puso en servicio en la región de Pevek (Siberia Oriental) una unidad móvil de baja potencia, consistente en una barcaza con dos reactores modulares de diseño ruso Rosatom, de 35 MW cada uno, del tipo KLT-40C, y dos turbogeneradores de vapor. Akademik Lomonosov constituye la primera central nuclear flotante del mundo para la

producción de electricidad. También podría convertirse en una planta de desalación con capacidad para producir 240.000 m³ de agua diarios.

Akademic Lomonosov, en Rusia, es la primera central nuclear flotante del mundo y también el primer SMR que se puso en funcionamiento