

REACTORES MODULARES PEQUEÑOS (*Small Modular Reactors*)

Luis Ulloa (Westinghouse Technology Services, S.A.)

INTRODUCCIÓN

Según la OIEA, se denominan Reactores Nucleares Pequeños (*Small Nuclear Reactors*) a aquellos reactores nucleares con una potencia eléctrica inferior a 300 MWe y Reactores Nucleares Medios hasta una potencia de 700 MWe. Considerando ambos tipos, la OIEA hace referencia a ellos como “Small and Medium Reactors” (SMR), aunque normalmente las siglas “SMR” se utilizan como acrónimo para designar a los “Small Modular Reactors” o Reactores Modulares Pequeños. El término “modular” en el contexto de los SMRs hace referencia a un único reactor o módulo que puede agruparse con otros módulos para llegar a formar un central nuclear de mayor tamaño.

En esta Nota se utilizará la abreviatura SMR para este tipo de reactores, ya que es la normalmente utilizada por la comunidad internacional.

Las ventajas aportadas por estos reactores, atendiendo a lo indicado por sus diseñadores/promotores, frente a las centrales nucleares de

gran potencia (≥ 1000 MWe) son las siguientes:

- Coste absoluto considerablemente inferior, estimado en el orden de unos centenares de millones de dólares en lugar de aproximadamente unos 5.000 millones de una central nuclear tradicional. Más fáciles de financiar y con menores riesgos económicos.
- Construcción de los reactores en fábrica, pudiéndose transportar por ferrocarril o carretera hasta el emplazamiento.
- Plazos de construcción estimados en 18 meses, con las ventajas de hacerlo en un entorno controlado, minimizando los retrasos asociados a los grandes proyectos. Posibilidad de fabricación en serie de los componentes utilizados, que se beneficiaría de las economías de escala.
- Solución atractiva para países con redes de distribución pequeñas, lugares remotos sin acceso a la red principal, bases militares que necesitan alimentación eléctrica de gran fiabilidad. Alternativa interesante para pequeñas compañías productoras de electricidad.

- Solución idónea para la sustitución de centrales antiguas de carbón de pequeña o mediana potencia, en sus mismos emplazamientos.
- Reducción de gases de efecto invernadero, permitiendo cumplir con los objetivos establecidos en acuerdos internacionales y por numerosos gobiernos.
- Necesidades de terreno y uso de agua muy inferiores a las requeridas por las grandes centrales.
- Impacto favorable para la economía en aquellos países que desarrollen esta tecnología, a través de inversiones en I+D.
- Permiten otras aplicaciones diferentes a la producción de electricidad: generación de calor para procesos industriales, tales como plantas petroquímicas, extracción de petróleo de pizarras bituminosas, plantas de desalinización de agua de mar, etc.

- Beneficios potenciales en relación a la no proliferación de materiales nucleares.

TIPOS DE REACTORES SMR

Existe una variedad de diseños de los SMR, en desarrollo en varios países. Algunos son versiones simplificadas de los reactores actuales mientras que otros están basados en tecnologías totalmente nuevas.

En la tabla al pie de página se muestran algunos ejemplos de reactores en un estado de desarrollo bastante avanzado.

Ante los numerosos diseños existentes, en esta Nota Técnica se analizarán exclusivamente algunos de los SMR que están siendo desarrollados en Estados Unidos. En un futuro se verá la edición de una nueva Nota Técnica tratando otros reactores.

Nombre	Potencia	Tipo	Diseñador / Promotor
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Rusia
VK-300	300 MWe	BWR	Atomenergoproekt, Rusia
CAREM	27-100 MWe	PWR	CNEA & INVAP, Argentina
4S	10-50 MWe	FNR	Toshiba-Japón
SMR Westinghouse	200 MWe	PWR	Westinghouse, EE.UU
mPower	125-180 MWe	PWR	Babcock & Wilcox + Bechtel, EE.UU
HI-SMUR	140 MWe	PWR	Holtec, EE.UU
SMART	100 MWe	PWR	KAERI, Corea del Sur
NuScale	45 MWe	PWR	NuScale Power + Fluor, EE.UU
CAP-100/ACP100	100 MWe	PWR	CNNC & Guodian, China
HTR-PM	2x105 MWe	HTR	INET & Huaneng, China
PBMR	80 MWe	HTR	Westinghouse-Eskom, Sudáfrica
GT-MHR	285 MWe	HTR	General Atomics (EE.UU), Rosatom (Rusia)
ANTARES	250 MWe	HTR	Areva, Francia- EE.UU
BREST	300 MWe	FNR	RDIPE, Rusia
SVBR-100	100 MWe	FNR	Rosatom/En+, Rusia
Gen4	25 MWe	FNR	Gen4 Energy, EE.UU
Prism	311 MWe	FNR	GE-Hitachi, EE.UU
FUJI	100 MWe	MSR	ITHMSO, Japan-Russia- EE.UU
TerraPower	10 MWe	TWR	Intellectual Ventures —EE.UU

A continuación se exponen estos diseños, clasificados según la tecnología utilizada.

REACTORES DE AGUA LIGERA

Reactores que utilizan agua ligera, basados en tecnologías ya probadas en reactores de gran potencia. Su riesgo tecnológico es menor que el de los otros diseños, ya que son similares a la mayoría de las centrales en operación y a los reactores utilizados para la propulsión naval. En general utilizan combustible con un grado de enriquecimiento inferior al 5% en U-235, con intervalos entre recargas inferiores a los 6 años y sus dificultades de licenciamiento son menores que los que previsiblemente presenten otros diseños más novedosos cuyas mejoras están sujetas a demostración.

Su principal objetivo es la producción de electricidad. Entre estos se encuentran el SMR (Westinghouse), el HI-SMUR (Holtec), el mPower (Babcock & Wilcox) y el NuScale (NuScale).

SMR Westinghouse

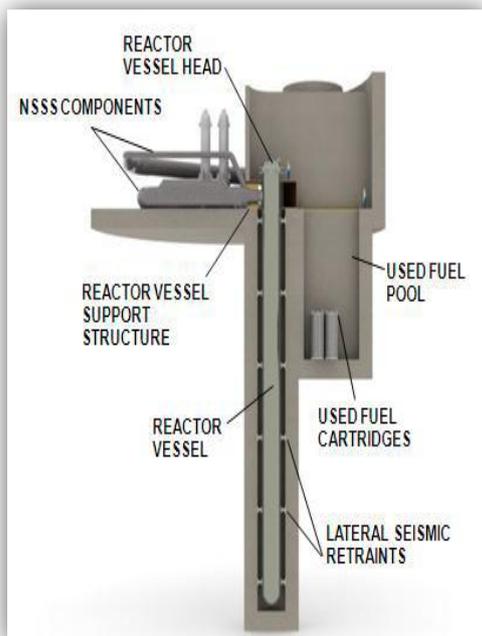
Se trata de un reactor de 800MWt/225 MWe, con sus principales componentes integrados, de agua a presión, sistemas de seguridad pasivos, e internos del reactor y el combustible basados en los del modelo AP1000. Contiene 89 elementos de 2.44 m de longitud activa, con un enriquecimiento inferior al 5%. El generador de vapor está situado encima del núcleo, alimentado éste por 8 bombas de flujo axial montadas horizontalmente. La vasija del reactor se enviará al emplazamiento por ferrocarril y una vez allí se instalará en una vasija de

contención de 9,8 m de diámetro y 27 m de altura situada por debajo del nivel del terreno. El módulo de la vasija del reactor tiene 25 m de altura y 3,5 m de diámetro. El intervalo entre recargas es de 24 meses. La seguridad pasiva significa que no se requiere la intervención del operador durante 7 días después de un accidente. La NRC espera una solicitud de certificación del diseño dentro de 2012. El DOE considera este SMR como un diseño LWR disponible en el corto plazo.



HI-SMUR Holtec

Holtec Internacional ha creado una subsidiaria – SMR LLC – para comercializar un reactor de 140 MWe denominado Holtec Inherently Safe Modular Underground Reactor (HI-SMUR). Es un reactor de agua a presión con el generador de vapor externo y el combustible similar al de los grandes PWR. El enfriamiento es completamente pasivo, tanto en operación como en parada. El reactor va instalado bajo el nivel del terreno. Se contempla un período de construcción de 24 meses. Holtec prevé solicitar la certificación de diseño a la NRC a finales de 2012 y espera tener la primera unidad en operación en 2018. El Grupo Shaw contribuye al diseño con apoyo de ingeniería. En Marzo de 2012 el DOE firmó un acuerdo con Holtec para la construcción de un prototipo de 160 MWe en su emplazamiento de Savannah River en Carolina del Sur. Se ha designado esta unidad como “SMR-160 basada en HI-SMUR”



mPOWER Babcock & Wilcox

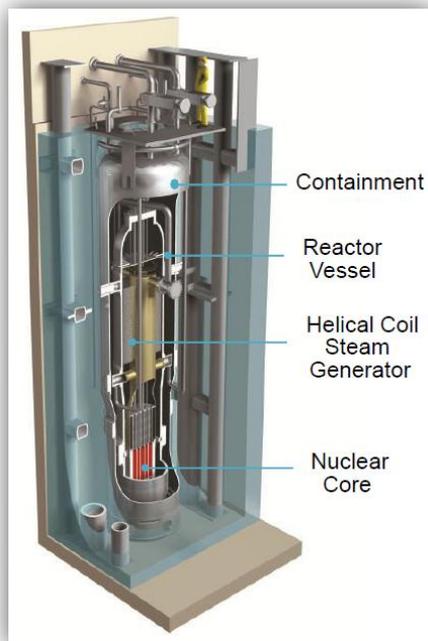
Se trata de un reactor de agua a presión de 125 MWe que está siendo desarrollado por Babcock & Wilcox, que ha constituido B&W Modular Nuclear Energy LLC para la comercialización del diseño, en colaboración con Bechtel. Sus componentes principales están integrados con la vasija del reactor. Se instalará por debajo del nivel del terreno, con un condensador refrigerado por aire y sistemas de seguridad pasivos. La circulación del refrigerante se realiza mediante bombas verticales montadas en la cabeza de la vasija. Los elementos de combustible son del tipo 17x17, siendo el grado de enriquecimiento del 5% y con ciclos de recarga 4,5 años. El generador de vapor es vertical de tubos rectos, de un solo paso. El módulo completo tiene un diámetro de 3,6 m por 22 m de altura.



NuScale - NuScale

Desarrollado por NuScale Power, en la que participa Fluor, empresa multinacional de construcción e ingeniería.

Se trata de un reactor de 45 MWe de potencia, con una configuración integrada de un PWR. La refrigeración del primario se realiza mediante circulación natural, con elementos de combustible 17x17 y ciclos de recarga de 3,5 años. Utiliza combustible estándar LWR, con un enriquecimiento del 4,95%. El generador de vapor está formado por tubos helicoidales. La central de referencia contiene 12 módulos, cada uno de los cuales irá alojado en una contención cilíndrica de 20 m de altura y 4,2 m de diámetro, instalados uno a continuación del otro en un tanque subterráneo lleno de agua y operado desde una sala de control única. Esta configuración es idónea para reemplazar las centrales de carbón, cuya potencia está normalmente comprendida entre 270 y 540 Mw.



REACTORES REFRIGERADOS POR GAS

La principal utilización de estos reactores es la generación de calor para procesos industriales. Como ejemplo se describirá el GT-MHR (General Atomics).

GT-MHR General Atomics

Este reactor está dimensionado para una potencia de 287 MWe para cumplir con los requisitos del proyecto de la Nueva Generación de Centrales Nucleares (NGNP) promovido por el DOE de EE.UU. El refrigerante primario del reactor es helio, siendo el moderador un bloque prismático de grafito.



El combustible es TRISO, formado por partículas de UO_2 o UOC de diámetro inferior a 1 mm. Utiliza el ciclo Brayton directo de conversión de potencia y lazo indirecto para aplicaciones de calor de proceso. La eliminación del calor residual se realiza por medios pasivos. Consta de dos vasijas interconectadas encapsuladas dentro de una estructura de

contención de hormigón situada bajo tierra. Una de las vasijas contiene el sistema del reactor y está basado en el MHR (Modular High-temperature Reactor) desarrollado dentro del programa del DOE para reactores modulares de alta temperatura refrigerados por gas. La segunda vasija contiene el sistema de conversión de potencia. La turbomáquina consta de un generador, una turbina y dos compresores montados sobre un eje único rotando sobre cojinetes magnéticos. Lleva un recuperador del calor procedente de la descarga de la turbina que eleva el rendimiento de la central desde el 34% al 48%.

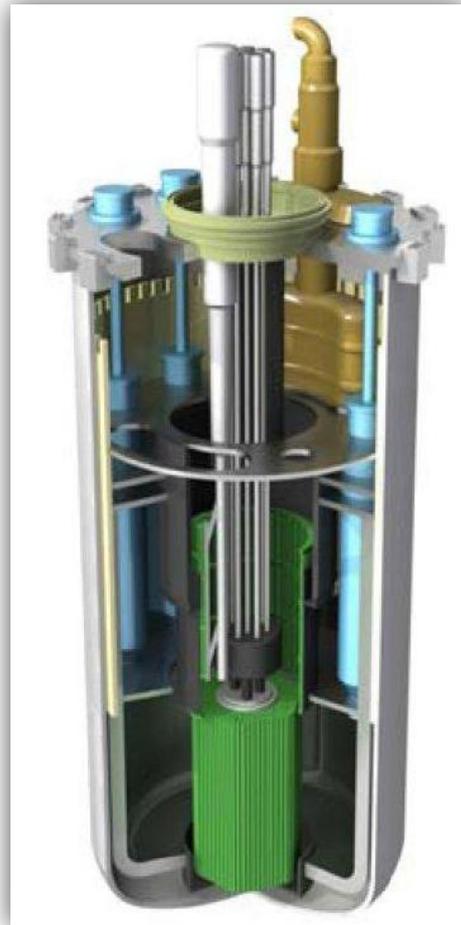
REACTORES REFRIGERADOS POR METAL LÍQUIDO

Estos reactores han sido desarrollados para la gestión del ciclo de combustible. Ejemplos: PRISM (General Electric-Hitachi), ARC-100 (ARC), HPM (Hyperion).

PRISM – General Electric

El reactor PRISM, tipo piscina y diseño compacto, tiene una potencia de 311 MWe, con una configuración integral con cambiadores de calor intermedios. Opera a alta temperatura, por encima de 500°C, siendo el combustible metálico una aleación U-Pu-Zr. El combustible permanece en el reactor alrededor de seis años, reemplazándose un tercio cada dos años. Se recicla el combustible gastado después de la separación de los productos de fisión, de forma que estos reactores se integren con una instalación de reprocesamiento. Los módulos se instalan bajo tierra conteniendo el circuito primario con sodio como

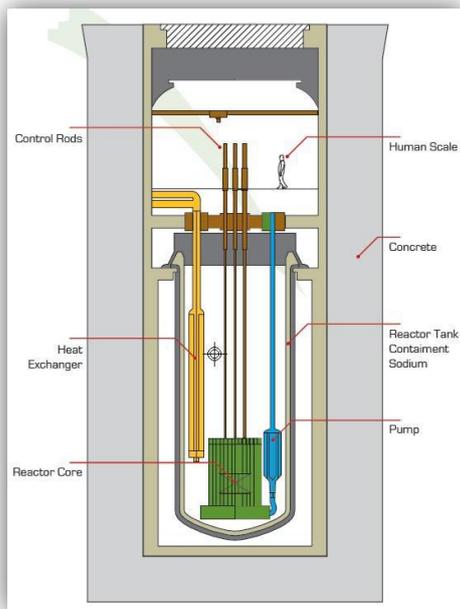
refrigerante. La eliminación del calor residual se realiza por medios pasivos. La utilización a escala comercial de este reactor, que sería parte de un Centro de Reprocesamiento Avanzado (*Advanced Recycling Center*) consistiría en tres bloques de potencia (seis módulos) que suministrarían una potencia eléctrica de 1866 MWe.



ARC 100 - Advanced Reactor Concept

Este reactor está siendo desarrollado por la empresa Advanced Reactor Concepts, que cuenta con el apoyo de varios investigadores procedentes de los laboratorios nacionales de EE.UU. El reactor, con una potencia de 100 MWe, siendo el

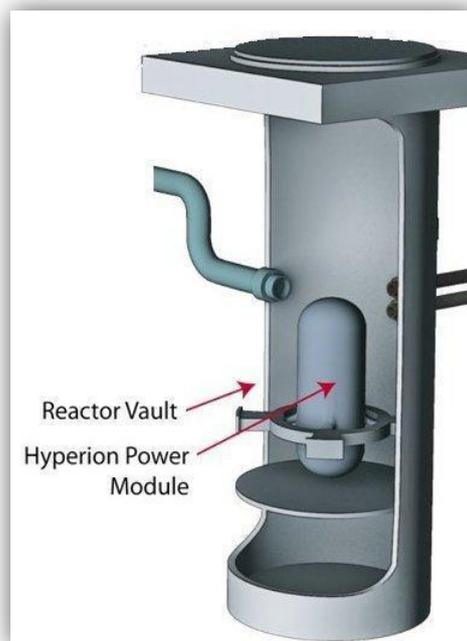
sodio el refrigerante primario, utiliza una unidad de conversión de potencia basada en el ciclo Brayton, que utiliza CO₂ líquido con un rendimiento esperado en la transferencia de calor del 40%. El combustible es una aleación metálica de U/Zr, enriquecido al 14%, con ciclos de recarga de 20 años. El combustible está basado en el que utilizó un reactor rápido refrigerado por sodio construido y operado en el Laboratorio Nacional Argonne en Idaho. Forma parte de un diseño consistente en un modelo de generación de potencia distribuida con centros regionales del ciclo de combustible, con capacidad de reprocesamiento del combustible.



GEN4 (G4M) Power Module

Reactor basado en un diseño inicial del Laboratorio Nacional de Los Alamos (LANL), que actualmente lo está desarrollando la empresa Gen4 Energy, Inc. (previamente Hyperion Power Generation, Inc.). Se trata de un reactor de 70 MWt/25 MWe de potencia, refrigerado por una alea-

ción eutéctica plomo-bismuto, que utiliza un combustible cerámico de nitruro de uranio con un grado de enriquecimiento del 20%. La vida del núcleo es de 10 años, retornándose el módulo completo a fábrica. Una vez terminada su vida útil, se sustituiría por un módulo nuevo. El módulo completo va enterrado y encapsulado en hormigón. La vasija del reactor que alberga el núcleo y el circuito primario tiene un diámetro aproximado de 1,5 m y 2,5 m de ancho, fácil de transportar, sin partes móviles. Dispone de un circuito secundario que transfiere el calor a un generador de vapor externo. El G4M pretende acceder al mercado en el que la electricidad se produce mediante generadores diesel, tales como lugares remotos e islas que no están conectadas a la red eléctrica general, proyectos de minería e instalaciones de producción de petróleo y gas no conectadas a la red e instalaciones del Gobierno que necesitan un suministro fiable de electricidad independiente de la red.



CONSIDERACIONES DE LICENCIAMIENTO Y FINANCIACIÓN

La Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de EE.UU. está preparada para recibir solicitudes de los fabricantes de SMRs y empresas eléctricas, habiendo identificado varios temas genéricos agrupados en cuatro categorías básicas:

- Proceso de licenciamiento
- Requisitos de Diseño
- Requisitos de Funcionamiento
- Implicaciones Financieras

La NRC ya se encuentra trabajando con estos temas, con especial dedicación a los diseños basados en los reactores de agua ligera (LWR). Los diseños no-LWR requerirán mayor tiempo para su revisión, aunque ya cuenta con cierta experiencia de licenciamiento.

Por su parte el Departamento de Energía (DOE) de EE.UU. anunció que dedicará 450M\$ los próximos cinco años a financiar el desarrollo de dos diseños de SMR, compartiendo los gastos de R&D con la industria al 50%. El objetivo del DOE es priorizar la financiación de aquellos SMRs que pudieran estar licenciados y en operación no más tarde del año 2022.

CONCLUSIÓN

Existe en la actualidad, a nivel mundial, un gran interés en el desarrollo de los Reactores Modulares Pequeños (SMR), que posiblemente constituyan la próxima generación de centrales nucleares. Entre sus ventajas cabe destacar el coste, construcción en fábrica con plazos estimados en 18 meses y transporte

por ferrocarril o carretera al emplazamiento, adecuación a redes de distribución pequeñas o lugares remotos, potencia adecuada para sustituir a centrales de carbón obsoletas en sus mismos emplazamientos. En Estados Unidos, el SMR cuenta con apoyo institucional, tanto del DOE como de la NRC. Se espera contar con un SMR en operación en EE.UU. en el plazo 2020-2022.

ABREVIATURAS

DOE: Department of Energy (USA)

HPM: Hyperion Power Module

HI-SMUR: Holtec Inherently Safe Modular Underground Reactor

INPRO: International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycle

LWR: Light Water Reactor

NRC: Nuclear Regulatory Commission (USA)

OIEA: Organización Internacional de la Energía Atómica

PRISM: Power Reactor Innovative Small Module

PWR: Pressurized Water Reactor

SMR: Small Modular Reactor

TRISO: TRistructural - ISOtropic

UOC: Uranium Oxycarbide

BIBLIOGRAFÍA

1. Overview and Status of SMRs Being Developed in the United

- States, Daniel Ingersoll, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. http://www.iaea.org/INPRO/3rd_Dialogue_Forum/07.Ingersoll.pdf
2. Small Nuclear Power Reactors. World Nuclear Association. [Small Nuclear Power Reactors.](#)
 3. Nuclear Power Technology Development. Common Technologies and Issues for Small and Medium Sized Reactors. <http://www.iaea.org/NuclearPower/SMR>
 4. The Westinghouse Small Modular Reactor. [Westinghouse SMR](#)
 5. Small modular reactor. Wikipedia. [Small modular reactor - Wikipedia](#)
 6. U.S. NRC Advanced Reactors. [NRC: Advanced Reactors](#)
 7. The U.S. Department of Energy's Office of Nuclear Energy. http://www.nuclear.energy.gov/pdfFiles/factSheets/2011_SMR_Factsheet.pdf
 8. U.S. Department of Energy. Obama Administration Announces \$450 Million to Design and Commercialize U.S. Small Modular Nuclear Reactors. [DOE - Office of Nuclear Energy](#)
 9. Instituto de la Ingeniería de España. Reactores modulares a pequeña escala, nueva esperanza de la energía nuclear. [Reactores modulares a pequeña escala.](#)
 10. Gen4 Module Technology. [Gen4 Energy](#)