

Reactores modulares pequeños una opción para México

Gonzalo Mendoza Guerrero

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Ocoyoacac, México
gonzalo.mendoza@inin.gob.mx

Xochitl López Rodríguez

Comisión Federal de Electricidad, Central Laguna Verde, Veracruz, México.
xochitl.lopez@cfе.gob.mx

RESUMEN

El objetivo fundamental de este trabajo es poner a consideración las nuevas tecnologías, así como sus ventajas y desventajas de los diseños de reactores modulares pequeños sobre los reactores grandes y promover la inclusión de algún tipo de reactor modular pequeño que permitiría en parte satisfacer las necesidades futuras de energía eléctrica.

PALABRAS CLAVE

Reactor modular, plantas nucleares, energía, electricidad.

ABSTRACT

The main objective of this work is to consider the new technologies, as well as their advantages and disadvantages of small modular reactor designs over large reactors and to promote the inclusion of some type of small modular reactor that would allow in part to meet future needs electric power.

KEYWORDS

Modular reactor, nuclear plants, energy, electricity.

INTRODUCCIÓN

En el mundo la tendencia con las plantas nucleares que concluyeron la licencia de operación está llevando a cabo los requerimientos reglamentarios que deben cumplirse con el fin de obtener una renovación de licencia, inclusive, ya se tiene la normativa aplicable y regulación para una segunda solicitud de renovación de licencia, que permite operar las plantas nucleares hasta 80 años.

Por otro lado, la inversión en energía cayó por tercer año consecutivo en 2017, según la Agencia Internacional de Energía y la inversión en energía nuclear se redujo en casi un 45% el año antepasado a 17 mil millones de dólares. El gasto en reactores nuevos alcanzó el nivel más bajo en cinco años, y la inversión en mejoras de unidades existentes aumentó.

Consideramos que para México sería una buena opción empezar a evaluar y estudiar las potencialidades de los diseños de reactores modulares pequeños para poder reiniciar un programa nuclear que contribuirá al cumplimiento de los

compromisos nacionales hacia el combate al cambio climático, así como en la generación de electricidad.

Aun cuando la Reforma Energética del 2013 no enfatiza el uso de la energía nuclear, si la define como “energía limpia” y por ello, es uno de los energéticos llamados a integrar la oferta de energías limpias que permitan cumplir los compromisos contraídos por el país en relación con la lucha contra el cambio climático. Entre las distintas fuentes de energía primaria disponibles hoy, la energía nuclear representa una de las opciones que permite generar energía en condiciones ambientalmente satisfactorias. La energía nuclear tiene una emisión muy baja de gases de efecto invernadero. Además, en un aspecto más amplio de evaluación de costos externos asociados a daños ambientales y a la salud, la energía nuclear se coloca dentro de las mejores alternativas de generación eléctrica.

El primer paso para poder llegar a implementar los diseños de reactores modulares pequeños es estudiando sus potencialidades y características de diseño, así como los desafíos que enfrenta su licenciamiento. Observar sus ventajas y desventajas y revisar la situación internacional y determinar su viabilidad para el país. Existe un gran interés en unidades pequeñas y más simples para generar electricidad a partir de la energía nuclear y para el calor del proceso. Este interés en los reactores de energía nuclear pequeños y medianos está impulsado tanto por el deseo de reducir el impacto de los costos de capital como por proporcionar energía lejos de los grandes sistemas de red. Las tecnologías involucradas son numerosas y muy diversas.

PANORAMA GENERAL DE LOS DISEÑOS, APLICACIONES Y DESARROLLO DE REACTORES MODULARES PEQUEÑOS

En esta sección se proporciona una descripción breve de los Reactores Modulares Pequeños (en inglés SMR), destacando sus características distintivas en comparación con las grandes centrales nucleares tradicionales, los reactores no modulares de menos de 700 MW(e). Las características de diseño y aplicaciones específicas de los SMR se describen junto con un rango de estimaciones para la viabilidad económica de su implementación.

Características de Diseño

Los reactores modulares pequeños tienen varias características de diseño que los diferencian de otras fuentes de generación de energía. En contraste con las grandes instalaciones de generación que utilizan combustibles fósiles o nucleares que normalmente tienen una producción de electricidad superior a 700 MW (e), los SMR generan una potencia menor a 300 MW(e). Si bien a nivel mundial existen varios diseños de reactores operando que caen dentro del rango de tamaño de los SMR pero que no tienen características semejantes a los SMR. Dependiendo del diseño específico del reactor, los SMR se caracterizan no solo por su tamaño, sino también por sus características que incluyen diseño integrado, modularidad de fabricación e instalación, seguridad pasiva y sistemas de remoción de calor, contención subterránea y requisitos de combustible reducidos.

Existen varias características de diseño que hacen que los SMR sean sustancialmente diferentes de los diseños de plantas de energía nuclear en operación.

Una de las características clave es la modularidad tanto en la fabricación como en el despliegue. Para los SMR, debido a una potencia térmica sustancialmente menor, los componentes del sistema primario se pueden integrar dentro o en la proximidad con la vasija del reactor, por lo tanto, formando un módulo de reactor que elimina la necesidad de tuberías de grandes longitudes para el refrigerante.

Además de las ventajas asociadas con su pequeño tamaño y naturaleza modular, los SMR tienen importantes características de diseño relacionadas con la seguridad pasiva, la eliminación pasiva de calor, la simplicidad de diseño y la no proliferación. Las funciones de seguridad pasiva permiten que los SMR se apaguen automáticamente, mientras se mantienen enfriados sin alimentación externa o intervención del operador, por un período de tiempo mucho más prolongado que los diseños de reactor refrigerado por agua convencionales en operación. La eliminación pasiva de calor permite que el reactor permanezca enfriado permitiendo que el enfriamiento tenga lugar a través de la gravedad, la convección y la evaporación, y sin el uso de bombas activas para hacer circular el fluido de enfriamiento. La simplicidad del diseño se realiza a través de una reducción grande en los componentes en comparación con las grandes instalaciones de energía, y mediante la integración de los sistemas primarios en una vasija simple del reactor.

Viabilidad Económica y Despliegue

Los diseños simplificados de SMR dan como resultado una reducción en el número de componentes y una reducción proporcional en los costos. La modularidad de los SMR que permite la fabricación centralizada de los componentes principales de la unidad de potencia tiene varias ventajas, incluida la estandarización de los componentes y el diseño, lo que genera importantes economías de producción en masa. Las economías de escala de la modularización provendrán no solo de la fabricación en masa de módulos de componentes, sino también de los aumentos de ganancias de productividad y eficiencia a medida que la producción de módulos sucesivos continúa a lo largo del tiempo. Las economías obtenidas a través de la fabricación y el aprendizaje en masa darán como resultado que los SMR sean económicamente competitivos con las instalaciones nucleares convencionales, compensando la pérdida de la “economía de escala” de las instalaciones nucleares más grandes.

Además de estas economías de escala, los SMR requieren tiempos de construcción más cortos en comparación con las grandes instalaciones de generación, lo que se traduce en una reducción de los costos de financiamiento a largo plazo y los riesgos de calendarización. Los costos operativos para la energía nuclear, incluidos los SMR, tienen una sensibilidad mucho menor a la volatilidad del costo del combustible que el carbón o el gas natural. Estos factores, junto con la recarga del reactor más eficiente y bajos costos de mantenimiento, pueden resultar en costos de electricidad muy competitivos y nivelados.

Aplicaciones de los SMRs

Las características de diseño de los SMR permiten una flexibilidad de implementación y una variedad de aplicaciones que no se encuentran en grandes

plantas de energía nuclear. Estas incluyen la incorporación de SMR en una variedad de tipos y tamaños de redes, opciones para la integración con energías renovables, aplicaciones no eléctricas y características de seguridad. En términos de integración de la red, el tamaño y la modularidad de los SMR les permite formar parte de redes eléctricas más pequeñas que sirven a una población más dispersa en comparación con las centrales nucleares o las instalaciones de generación de combustibles fósiles. Además, los módulos SMR pueden integrarse secuencialmente para proporcionar incrementos progresivos en la producción de energía.

Otra característica importante de los SMR es su uso potencial en aplicaciones no eléctricas. Si bien las grandes plantas nucleares y de combustibles fósiles se usan casi exclusivamente para producir electricidad, algunos SMR innovadores que operan a temperaturas más altas (por ejemplo, reactores de alta temperatura enfriados por gas) tienen potenciales aplicaciones adicionales. Las aplicaciones de cogeneración para las que los SMR son particularmente adecuadas son: 1) la provisión de calor de proceso para aplicaciones industriales; 2) calefacción urbana; y 3) desalinización térmica.

Además de su tamaño y modularidad, las características de diseño y seguridad de los SMR los hacen accesibles a mercados que no serían adecuados para grandes plantas nucleares o de combustibles fósiles. El emplazamiento en lugares que no sean cerca de grandes cuerpos de agua es posible, ya que el agua necesaria para enfriar un SMR se reduce significativamente. Además, los sistemas de seguridad pasiva de algunos diseños permiten que los SMR operen sin fuentes de energía o agua externas y sin acción humana durante períodos prolongados, lo que les permite operar en lugares donde los sistemas de soporte no están bien desarrollados. De manera similar, al construir por debajo del nivel del suelo, los requisitos de seguridad de SMR pueden ser menores que para plantas de energía nuclear más grandes.¹

COMPARACIÓN CON OTRAS ENERGÍAS LIMPIAS

La energía nuclear y la energía renovable son los principales competidores de la electricidad baja en carbono en muchos países. A medida que las tecnologías de energía renovable han crecido en volumen e inversión, se vuelven mucho más baratas. En respuesta a la crisis climática, pocos países tienen los recursos económicos para expandir sustancialmente la inversión en energía nuclear y renovable. Esto se demuestra en 2016 por el gobierno del Reino Unido, que está ofreciendo enormes subsidios a largo plazo a la energía nuclear, mientras que reduce severamente los subsidios existentes a corto plazo a la energía renovable.

Enseguida se presenta un análisis de tendencias respecto a la Energía Nuclear frente a energía renovable. A pesar de su producción variable, que en general se puede pronosticar al menos con la misma precisión que la demanda de electricidad, la energía eólica y solar fotovoltaica se está volviendo significativa. La electricidad real producida por energía solar fotovoltaica, eólica y nuclear presenta niveles cambiantes de producción desde 1997, durante este período, ha habido 616 TWh adicionales por año de energía eólica producida en 2013 en comparación con 1997, 124 TWh de energía solar fotovoltaica superando a la nuclear con solo 114 TWh.

La fecha de referencia es 1997, ya que esta era la fecha de la firma del Protocolo de Kyoto. Teniendo en cuenta el bajo nivel de desarrollo nuclear en los últimos 15 años, es sorprendente que agencias como la Agencia Internacional de Energía (AIE) sigan asumiendo en sus escenarios de descarbonización que habrá un aumento significativo en el despliegue de la energía nuclear.

Si bien, por un lado, reconocen el bajo nivel de inversión nuclear desde 2000, que la AIE calcula que es de US \$ 8 mil millones por año, aún asumen que durante 2014-2035 la inversión anual promediaría US \$ 78 mil millones. Esto parece muy divergente del sentimiento y las elecciones actuales del mercado, por lo que parece poco probable que se acelere la descarbonización del sector de la energía si no es simplemente imposible de lograr al confiar en el despliegue rápido de la energía nuclear.

La participación de la energía nuclear en la generación total de electricidad mundial disminuyó por décimo año consecutivo, a casi el 11% en 2015. Sin embargo, esto todavía corresponde a casi un tercio de la producción de electricidad baja en carbono del mundo. La rápida expansión impulsada por las políticas de la energía eólica, solar y la biomasa en la generación de electricidad continuó, pero los combustibles fósiles, especialmente el carbón, siguen siendo el principal combustible para el suministro de energía. Aunque las nuevas energías renovables (que incluyen energía eólica, solar y geotérmica, pero no hidroeléctrica) han superado a la energía nuclear en capacidad instalada total, su participación en la generación de electricidad real es menos de un tercio de la producida por la energía nuclear debido a su intermitencia.²

Para México, teniendo como marco de referencia que la tendencia mundial a invertir en programas relacionados con la energía va a la baja y, además, considerando que en la Reforma Energética del 2013 la energía nuclear se define como “energía limpia”, el uso de esta permitirá cumplir los compromisos contraídos en relación con la lucha contra el cambio climático.

Es conveniente que el sector de generación de energía que ha estado impulsando la inversión en energía solar fotovoltaica y eólica, no prescindiera de los beneficios y ventajas de la energía nuclear a través de los reactores pequeños modulares, ya que, se pueden construir unidades pequeñas independientes para sitios remotos, éstas se consideran una inversión más manejable. Una comparación con las energías limpias como la eólica y la solar estima que, el área ocupada por un parque eólico de 225 MWe es 4000 veces el área de un SMR de 225 MWe, y el área ocupada por una granja de energía solar fotovoltaica de 225 MWe es del orden de 160 veces la ocupada por un SMR de 225 MWe.

POTENCIALIDADES Y DISEÑOS DE LOS SMRs

El primer paso para poder llegar a implementar los diseños de reactores modulares pequeños es estudiando sus potencialidades y características de diseño, así como los desafíos que enfrenta su licenciamiento. Observar sus ventajas y desventajas y revisar la situación internacional y determinar su viabilidad para el país.

Existe un gran interés en unidades pequeñas y más simples para generar electricidad a partir de la energía nuclear y para el calor de proceso. Este interés

en los reactores de energía nuclear pequeños y medianos está impulsado tanto por el deseo de reducir el impacto de los costos de capital como por proporcionar energía lejos de los grandes sistemas de red. Las tecnologías involucradas son numerosas y muy diversas.

Ventajas y Desventajas de los SMRs

La Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) define “reactor pequeño” como inferior a 300 MWe, y hasta aproximadamente 700 MWe como “reactor mediano”. Juntos ahora la AIEA los denomina reactores pequeños y medianos (SMR).

El enorme potencial de los SMR se basa en una serie de factores como:

- Su pequeño tamaño y modularidad, los SMR casi podrían construirse completamente en un entorno de fábrica controlado e instalarse módulo por módulo, mejorando el nivel de calidad y eficiencia de la construcción.

- Su pequeño tamaño y características de seguridad pasiva los prestan para países con redes eléctricas más pequeñas y con menos experiencia en la energía nuclear.

- El tamaño, la eficiencia de la construcción y los sistemas de seguridad pasiva (que requieren menos redundancia) pueden conducir a un financiamiento más fácil en comparación con el de las plantas más grandes.

- Además, lograr “economías de producción en serie” para un diseño de SMR específico reducirá aún más los costos.

Las características de un SMR incluyen:

- Potencia pequeña y arquitectura compacta y usualmente (al menos para sistemas de suministro de vapor nuclear y sistemas de seguridad asociados) empleo de conceptos pasivos. Por lo tanto, existe una menor dependencia de los sistemas activos de seguridad y bombas adicionales, así como de la energía de Corriente Alterna para la mitigación de accidentes.

- La arquitectura compacta permite modularidad de fabricación (en la fábrica), lo que también puede facilitar la implementación de estándares de calidad más altos.

- La potencia más baja conduce a la reducción del término fuente, así como un menor inventario radiactivo en un reactor (reactores más pequeños).

- Potencial para la ubicación por debajo del nivel del suelo (subterránea o subacuática) de la unidad del reactor que proporciona más protección contra riesgos naturales (por ejemplo, sísmicos o tsunamis según la ubicación) o provocados por el hombre (por ejemplo, impacto de aeronaves).

- El diseño modular y el tamaño pequeño se presta para tener múltiples unidades en el mismo sitio.

- Menor requerimiento de acceso al agua de enfriamiento, por lo tanto, adecuado para regiones remotas y para aplicaciones específicas como la minería o la desalinización.

- Capacidad para remover el módulo del reactor o el desmantelamiento en sitio al final de la vida útil.

El licenciamiento es un desafío para los SMR, los costos de certificación del diseño, licencia de construcción y operación no son necesariamente menores que para reactores grandes, lo que supone una gran carga para los desarrolladores y los proponentes.³

Experiencia Nacional en SMRs

México a través del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares ha participado y adquirido experiencia en este concepto de reactores a través de convenios de colaboración con la compañía Westinghouse. El alcance de la participación fue en tareas relativas a los cálculos del Análisis Probabilístico de Riesgos para eventos internos en el diseño del reactor IRIS (en inglés, International Reactor Innovative & Secure).

IRIS de Westinghouse (International Reactor Innovative & Secure) es un diseño de reactor que se desarrolló durante más de dos décadas. Se propuso una capacidad de 1000 MWt, 335 MWe, aunque podría escalar a 100 MWe. IRIS es un reactor de agua a presión modular con sistema integral de refrigerante primario y circulación por convección. El combustible es similar a los LWR (Reactor de Agua Ligera) actuales y (al menos para la versión de 335 MWe) los ensambles de combustible serían idénticos a los de AP1000. El enriquecimiento es del 5% con veneno quemable e intervalo de recarga de hasta cuatro años (o más con un mayor enriquecimiento y combustible MOX). La certificación de diseño de los EE. UU, se encontraba en la etapa previa a la solicitud, pero ahora figura como “inactiva”, y el concepto ha evolucionado en el SMR de Westinghouse.⁴

Actualidad en Otros Países de los SMRs

Soporte de los Estados Unidos para los SMRs

En abril de 2018, el DOE seleccionó 13 proyectos para recibir \$ 60 millones USD de financiamiento de I + D de costo compartido para tecnologías nucleares avanzadas, incluidos los primeros reconocimientos en el marco de la Iniciativa de Oportunidades Industriales de los Estados Unidos para el Desarrollo Avanzado de la Tecnología Nuclear.

Soporte del Reino Unido para los SMRs

En diciembre de 2017, el Departamento de Negocios, Energía y Estrategia Industrial (BEIS), el departamento sucesor de DECC (Department of Energy & Climate Change), anunció que el concurso de SMR había sido cerrado. En cambio, se lanzó un nuevo concurso de reactor modular avanzado de dos fases, diseñado para incorporar una gama más amplia de tipos de reactores. El financiamiento total para el concurso es de hasta £ 44 millones, y se recibieron 20 ofertas para el plazo inicial del 7 de febrero de 2018.

Otros países

Países como China han desarrollado la tecnología para reactores modulares pequeños, el proyecto más avanzado se encuentra en China, donde Chinergy está comenzando a construir el HTR-PM (Reactor de Alta Temperatura) de 210

MWe, que consta de dos reactores gemelos enfriados por gas a alta temperatura, que se basan en la experiencia de varios reactores innovadores de los años 1960 a 1980.

Urenco (es una compañía de combustible nuclear que opera varias plantas de enriquecimiento de uranio en Alemania, los Países Bajos, los Estados Unidos y el Reino Unido) ha pedido el desarrollo europeo de reactores intrínsecamente seguros, muy pequeños de 4 MWe, basados en conceptos de HTR moderados con grafito. Está buscando apoyo del gobierno para un prototipo de “batería U” que funcionaría durante 5-10 años antes de requerir recarga de combustible o servicio.

Ya operan en Siberia cuatro unidades pequeñas en la planta de cogeneración Bilibino. Estas cuatro unidades de 62 MWt (térmicos), son un diseño inusual de agua hirviendo moderada con grafito con canales de agua / vapor a través del moderador. Producen vapor para calefacción urbana y 11 MWe (red) de electricidad cada uno, lejos de cualquier red. Son los reactores de potencia comercial más pequeños del mundo y han tenido un buen desempeño desde 1976, más baratos que las alternativas de combustibles fósiles en el clima severo de esta región ártica, pero se retirarán para el 2023.

También en la categoría de reactores pequeños están los reactores de agua pesada presurizados de 220 MWe (PHWR) basados en tecnología canadiense, y los PWR chinos de 300-325 MWe como los construidos en Qinshan Phase I y en Chashma en Pakistán, y ahora llamados CNP-300 (China Nuclear Power Unit).

La Corporación de Energía Nuclear de la India (NPCIL, Nuclear Power Corporation of India Limited) se está centrando ahora en las versiones de 540 MWe y 700 MWe de su PHWR, y está ofreciendo versiones de 220 y 540 MWe a nivel internacional. Estos pequeños diseños establecidos son relevantes para situaciones que requieren unidades pequeñas a medianas, aunque no son tecnología de punta.

Otra línea importante de desarrollo es en reactores rápidos muy pequeños de menos de 50 MWe. Algunos están concebidos para áreas alejadas de las redes de transmisión y con pequeñas cargas; otros están diseñados para operar en grupos en competencia con unidades grandes. Las tablas I y II muestran una lista de reactores pequeños en operación y reactores pequeños en construcción, respectivamente.³

PROPUESTA DE ACTIVIDADES PARA INCURSIONAR EN LOS SMRs

En los últimos años, ha habido un renacimiento de las actividades de investigación y desarrollo sobre los combustibles del Reactor Rápido Refrigerado por Metal Líquido (LMFR) y las opciones del ciclo del combustible.

Tabla I. Reactores pequeños en operación.

Nombre	Capacidad	Tipo	Desarrollador
CNP-300	300 MWe	PWR	SNERDI/CNNC, Pakistan & China
PHWR-220	220 MWe	PHWR	NPCIL, India
EGP-6	11 MWe	LWGR	at Bilibino, Siberia (cogen, soon to retire)

Tabla II. Diseño de reactores pequeños bajo construcción.

Nombre	Capacidad	Tipo	Desarrollador
KLT-40S	35 MWe	Integral PWR	OKBM, Russia
RITM-200	50 MWe	Integral PWR	OKBM, Russia
CAREM-25	27 MWe	Integral PWR	CNEA & INVAP, Argentina
HTR-PM	2x250 MWt	HTR	INET, CNEC & Huaneng, China
ACPR50S	60 MWe	PWR	CGN, China

Se tiene contemplado estudiar los orígenes y la naturaleza del daño por radiación a los materiales estructurales utilizados en los reactores rápidos, la selección y la composición química de los materiales de encamisado y envolvente utilizados para los LMFR.

En las siguientes subsecciones se indican algunos tópicos o temas que se tiene contemplado abordar, y al mismo tiempo llevar a cabo el proceso de formación de cuadros de trabajo y así incursionar o incorporarse en los desarrollos de diseños de reactores modulares pequeños.

Estimar el estado actual y las perspectivas futuras de los materiales estructurales para los ensambles de combustible del LMFR en general, y los materiales de encamisado y envolvente de combustible, en particular se centra en la necesidad de desarrollar aceros que sean fácilmente compatibles con los refrigerantes líquidos metálicos. Entre otros temas enfocados a la seguridad están los relacionados con las técnicas y metodologías del Análisis Probabilístico de la Seguridad.

Evaluación Probabilística de Riesgo

Un área clave de la estrategia de Evaluación Probabilística de Riesgo (PRA) del Reactor Modular Pequeño Avanzado es el desarrollo de metodologías y herramientas que se usarán para predecir la seguridad, la protección, el rendimiento y la viabilidad de despliegue de los sistemas del SMR a partir del Proceso de diseño a través de la fase de operación. El objetivo de la actividad del PRA de los SMR será desarrollar métodos y herramientas cuantitativos y el marco de análisis asociado para evaluar una variedad de riesgos. Estos riesgos se centrarán en los diseños de SMR y las estrategias operativas, ya que se relacionan con la base técnica detrás de la caracterización de la seguridad.

El desarrollo y la implementación de métodos de evaluación de seguridad centrados en SMR pueden requerir nuevos métodos analíticos o la adaptación de los métodos tradicionales al diseño avanzado y las características de operación de los SMR. El desarrollo de modelos de seguridad específicos de SMR para la determinación de margen proporcionará un caso de seguridad que describe los posibles accidentes, las opciones de diseño (incluidos los controles postulados) y respalda las actividades de concesión de licencias al proporcionar una base técnica sobre seguridad.

En los diseños de SMR, como en los diseños de reactores más grandes, la estrategia de defensa en profundidad se utiliza para proteger al público y al medio

ambiente de las liberaciones accidentales de radiación. Ciertas características comunes de los reactores más pequeños se prestan a características de seguridad pasivas e inherentes, tales como tamaños de núcleo relativamente más pequeños que permiten diseños de sistemas de refrigerante integrales y relaciones de superficie / volumen mayor del reactor o densidades de potencia del núcleo más bajas que facilitan la eliminación pasiva del calor de decaimiento. Usando los beneficios de tales características, el objetivo principal es eliminar o prevenir, a través del diseño, la mayor cantidad posible de iniciadores de accidentes y las consecuencias de los accidentes. Los iniciadores de accidentes plausibles restantes y las consecuencias se abordan mediante combinaciones apropiadas de sistemas de seguridad activos y pasivos. El resultado esperado es una mayor simplicidad de la planta con altos niveles de seguridad que, a su vez, pueden permitir reducir los requisitos de emergencia fuera del sitio.⁵

Daños por Radiación en Materiales Estructurales del Núcleo en Reactores Rápidos de Metal Líquido

A partir de que los SMR están en desarrollo para todas las líneas principales de reactores como son los Reactores de Agua Ligera (LWR), Reactores de Agua Pesada (HWR), Reactores Enfriados por Gas (GCR) y los Reactores Refrigerados por Metal Líquido (LMCR), en esta última línea hay dos reactores de cría. Se está considerando llevar a cabo investigaciones sobre la tecnología de reactores rápidos, en actividades tales como el estudio de daño por radiación sobre los materiales estructurales del núcleo debido a intensos ambientes de neutrones, además de estudios sobre compatibilidad de los aceros con los refrigerantes de metal líquido.

Daño por radiación debido a intensos ambientes de neutrones

En diversos entornos de reactores hay campos intensos de fotones, partículas cargadas y neutrones, cada uno de los cuales posee una amplia gama de energías. Todos estos tipos de radiación pueden causar cambios en los materiales estructurales. En general, sin embargo, se experimenta un balance diferente de las contribuciones de daños no solo para cada material sino también para cada tipo de reactor y para cada tipo de ubicación como núcleo, manto, reflector, vasija de contención, etc. También se estudian otros aspectos que afectan al desempeño del combustible, así como los criterios de diseño para tubos de encamisado y envolvente

En los reactores basados en la fisión nuclear, los neutrones existen en un rango de energía que abarca alrededor de 10 órdenes de magnitud, pero la contribución relativa de cualquier rango de energía dado varía principalmente con el tipo de refrigerante principalmente y el tipo de combustible de manera secundaria. Los neutrones crean dos tipos de daño, uno de los cuales predomina en las energías inferiores (transmutación) y el otro en las energías superiores (desplazamiento atómico). Para las aleaciones estructurales ubicadas en las regiones del núcleo y cercanas al núcleo de los reactores rápidos, el daño predominante se produce como resultado de las colisiones de los neutrones de alta energía con los átomos en el metal, lo que crea más del 95% del daño por desplazamiento. En comparación con los reactores enfriados por agua, la transmutación es solo una contribución

de segundo orden al proceso de daño en aleaciones austeníticas y especialmente ferríticas irradiadas en reactores rápidos. Los campos de partículas cargadas y fotones no aumentan significativamente el desplazamiento atómico en los reactores rápidos, sino que contribuyen principalmente al calentamiento interno del componente, que generalmente se manifiesta como calentamiento gamma.

Compatibilidad de los Aceros con los Refrigerantes de Metal Líquido

Compatibilidad con sodio líquido

Un gran número de reactores rápidos experimentales refrigerados por sodio ya fueron construidos, lo que permite afirmar que el uso del sodio como refrigerante es hoy una tecnología conocida y madura, haciendo que el riesgo de introducción de nuevas tecnologías tenga grandes oportunidades de éxito, el gran desafío hoy es probar la competitividad económica del mismo.⁶

La evaluación de los efectos ambientales del sodio en las propiedades de resistencia mecánica es esencial para asegurar la integridad estructural durante toda la vida útil diseñada en los reactores rápidos enfriados con sodio. El encamisado del combustible se ve particularmente afectado por el sodio, ya que el encamisado es extremadamente delgado y las temperaturas de funcionamiento son muy altas. Por lo tanto, es importante comprender la compatibilidad de los materiales con sodio a temperaturas elevadas. Es imperativo que el líquido refrigerante de sodio utilizado tenga un estricto control de la química, particularmente con respecto a los elementos responsables de la fragilidad del metal líquido (As, Sb, Bi) y también del carbono y el oxígeno, que son los principales responsables de la degradación de las propiedades mecánicas y la corrosión.

Compatibilidad del plomo - bismuto líquido con aceros inoxidables

Estudiar los mecanismos de erosión-corrosión por Pb-Bi, así como la corrosión en Pb-Bi eutéctico. La compatibilidad de los aceros con un flujo de plomo líquido-bismuto eutéctico (45Pb-55Bi) es una de las cuestiones clave para los reactores rápidos enfriados con Pb-Bi. Este problema es mucho más crítico que en los sistemas enfriados con sodio.

Se puede concluir, resumiendo, que las tecnologías para el uso de plomo o de plomo bismuto eutéctico como refrigerante precisan ser sedimentadas, necesitando aún muchas pruebas de resistencia a la corrosión en alta temperatura; el mapeo de la corrosión en función de la temperatura, velocidad de desfogue y presencia de oxígeno, para materiales del reactor y del encamisado del combustible; pruebas de degradación de las propiedades mecánicas de los materiales estructurales [6].

Algunos defectos formados por la disolución de elementos de aleación en Pb-Bi pueden mejorar el desprendimiento de un trozo de acero de la matriz de acero. Por lo tanto, la penetración de Pb-Bi puede causar erosión a gran escala. Estos estudios concluyen que los aceros con bajo contenido de Cr y el acero austenítico se erosionan más fácilmente bajo el bajo potencial de oxígeno presente en el flujo de Pb-Bi, por lo tanto, los aceros con alto contenido de Cr (sin Ni) deberían ser una opción preferida para resistir la corrosión en Pb-Bi.⁷

CONCLUSIONES Y EXPECTATIVAS

Las decisiones acerca de la viabilidad y factibilidad para considerar la opción de los reactores modulares pequeños deben ser tomadas por el Gobierno Federal a través de la Secretaría de Energía. El fortalecimiento de la actividad nuclear en México a través de la promoción de nuevas tecnologías energéticas contribuirá al cumplimiento de los compromisos nacionales hacia el combate al cambio climático.

Promover la inclusión de cualquier tipo de reactor modular pequeño como parte del Plan de Expansión del Sistema Eléctrico Mexicano complementando así la participación de las energías renovables que permitiría en parte satisfacer las necesidades futuras de energía eléctrica, al mismo tiempo evitando la dependencia del uso del gas y energéticos fósiles.

Dar continuidad a la adquisición de experiencia y entrenamiento en el campo de la energía nuclear en México a través del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y otras instituciones, y en algunos aspectos replantearse como es el caso de los diferentes diseños de Reactores Avanzados, Avanzados/Pasivos y de Nueva Generación, con el objeto de reactivar y dar impulso a las actividades que conduzcan al desarrollo científico y tecnológico en estos temas.

Considerando la experiencia adquirida a través de la operación de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde y además de tomar en cuenta la colaboración que ha existido entre el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y la Central, se propone se estudie la posibilidad de que ambas instituciones trabajen en un programa conjunto sobre las tecnologías de diseños de pequeños reactores modulares estudiando sus potencialidades y características de diseño, así como los desafíos que enfrenta su licenciamiento y determinar su posible viabilidad.

Esperamos iniciar las tendencias de México en estas tecnologías estableciendo proyectos de investigación auspiciados por el Organismo Internacional de Energía Atómica entre otros, e incluir colaboración con otras instituciones mexicanas.

REFERENCIAS

1. IAEA-tecdoc series. Deployment Indicators for small modular reactors. methodology, analysis of key factors and case studies. International Atomic Energy Agency Vienna. IAEA-TECDOC-1854. 2018.
2. Antony Froggatt, Mycle Schneider. Nuclear Power Versus Renewable Energy- A Trend Analysis. Point of view. Vol. 103. p. 487-490. (2015).
3. <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>. (2019).
4. G. Mendoza. J. Viáis. A. Maioli. D. Finnicum. Modeling of Emergency Heat Removal System of the IRIS. Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR. XV Congreso Anual de la SNM y XXII Reunión Anual de la SMSR. Cancún, Q. R., México, 11-14 de Julio, 2004.
5. IAEA Nuclear Energy Series. Design Features to Achieve Defence in Depth in Small and Medium Sized Reactors. International Atomic Energy Agency Vienna, 2009.

6. G. Mendoza, J. Klapp. Contribución de los Reactores Rápidos de IV Generación al Desarrollo Sustentable. “Contribución de la Energía Nuclear al Desarrollo Sustentable de América Latina” 2007 XXV Reunión Anual de la SMSR y XVIII Congreso Anual de la SNM. Cancún, Quintana Roo, México, del 1 al 5 de Julio 2007. p. 520-537.
7. IAEA Nuclear Energy Series. Structural Materials for Liquid Metal Cooled Fast Reactor Fuel Assemblies Operational Behaviour. International Atomic Energy Agency Vienna, 2012.



**¡Anúnciense en
INGENIERÍAS!**

i

INFORMES:

Tel. (52) 818-329-4020 ext. 5854
e-mail: revistaingenierias@uanl.mx
Internet: www.ingenierias.uanl.mx

The advertisement features a large green circle on a black background. Inside the circle, the text '¡Anúnciense en INGENIERÍAS!' is written in white, bold, sans-serif font. Below this is a white logo consisting of a lowercase 'i' inside a circle. To the right of the logo are three overlapping covers of the journal 'Ingenierías', numbered 56, 57, and 58. Below the logo, the word 'INFORMES:' is written in white. At the bottom of the circle, contact information is provided: 'Tel. (52) 818-329-4020 ext. 5854', 'e-mail: revistaingenierias@uanl.mx', and 'Internet: www.ingenierias.uanl.mx'.