

## HACIA UNA TRANSICIÓN ENERGÉTICA SOSTENIBLE: EL PAPEL DE LOS REACTORES MODULARES PEQUEÑOS

Héctor Quiroga-Barriga <sup>a</sup>, César Ramírez-Márquez <sup>a</sup>, José María Ponce-Ortega <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 58060, México. jose.ponce@umich.mx

### Resumen

La creciente demanda de energía y el impacto ambiental de los combustibles fósiles exigen una transición hacia fuentes más sostenibles. Actualmente, el sector energético es responsable del 75% de las emisiones globales. Las energías renovables, aunque prometedoras, enfrentan desafíos de intermitencia. En este contexto, la energía nuclear surge como una opción viable, con los Reactores Modulares Pequeños destacando por su eficiencia, seguridad y adaptabilidad. Los Reactores Modulares Pequeños pueden instalarse en regiones aisladas, apoyar la estabilidad energética y reducir emisiones. Sin embargo, su desarrollo enfrenta desafíos como regulaciones y falta de inversión. Su implementación en México podría mitigar la pobreza energética y contribuir a una transición energética sostenible.

*Palabras clave:* Transición energética; Energía nuclear; Reactores modulares pequeños; Sostenibilidad; Reducción de emisiones.

## TOWARDS A SUSTAINABLE ENERGY TRANSITION: THE ROLE OF SMALL MODULAR REACTORS

### Abstract

The growing demand for energy and the environmental impact of fossil fuels call for a transition toward more sustainable sources. Currently, the energy sector is responsible for 75% of global emissions. While renewable energy holds great promise, it faces challenges related to intermittency. In this context, nuclear energy emerges as a viable option, with Small Modular Reactors (SMRs) standing out for their efficiency, safety, and adaptability. SMRs can be deployed in remote regions, support energy stability, and reduce emissions. However, their development faces challenges such as regulatory hurdles and lack of investment.

Their implementation in Mexico could help alleviate energy poverty and contribute to a sustainable energy transition.

*Keywords:* Energy transition; Nuclear energy; Small modular reactors; Sustainability; Emission reduction.

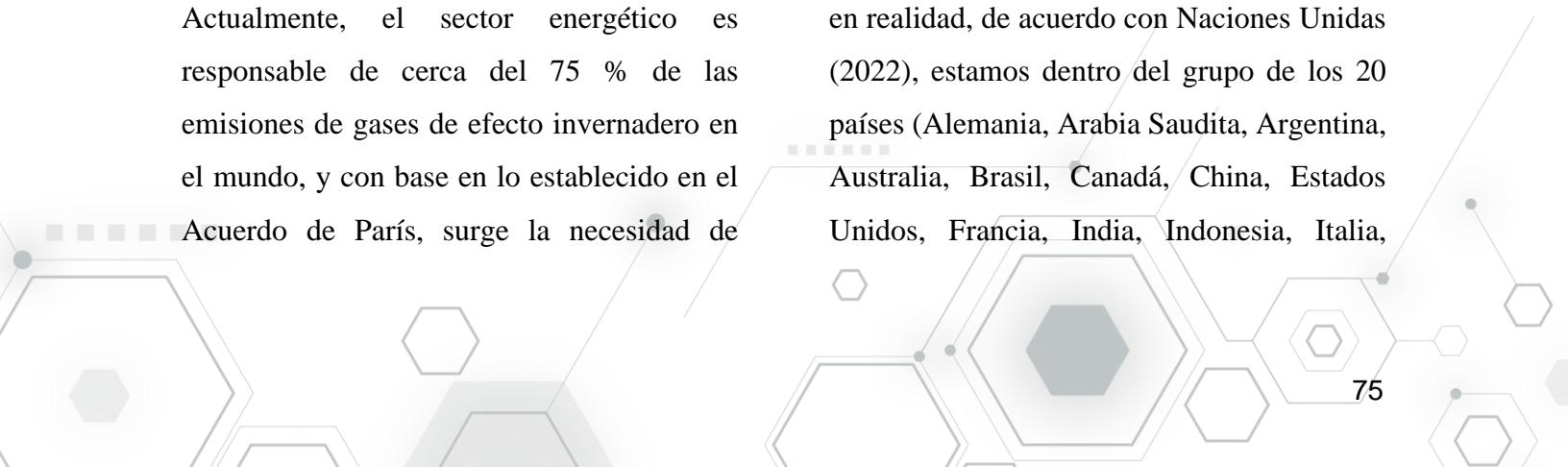


## 1. Introducción

El crecimiento constante de la población mundial, así como los avances tecnológicos hacen que en el mundo se necesite cada vez más energía, por lo que la producción de electricidad enfrenta un gran desafío. Hoy en día, la producción de energía eléctrica en el mundo sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo). Sin embargo, el uso excesivo de este tipo de combustibles nos ha llevado a causar efectos graves en el medio ambiente debido a las emisiones de gases de efecto invernadero que produce la quema de estos combustibles, lo que lleva a que la temperatura global aumente en exceso y, si se continua así, podríamos llevar al planeta a un punto de no retorno, por lo que es necesario impulsar una transición energética, en la que migremos a sistemas energéticos más amigables con el medio ambiente, con el fin de alcanzar el objetivo Net Zero que se refiere a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero lo más posible hasta lograr emisiones nulas para el año 2050. Actualmente, el sector energético es responsable de cerca del 75 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo, y con base en lo establecido en el Acuerdo de París, surge la necesidad de

reducir las emisiones en un 45 % para el año 2030 y así poder alcanzar el objetivo para 2050 (Naciones Unidas, 2022).

Para el año de 2019, las energías solar, fotovoltaica y eólica representaron un 8% de la generación eléctrica mundial, por otro lado, la generación hidroeléctrica representó un 16%, mientras que la nuclear representó un 10%, por lo que la generación de electricidad con bajas o nulas emisiones de carbono representó un 37%, mientras que la producción por fuentes fósiles representó un 63% de la producción eléctrica mundial como se muestra en la **Figura 1** (Shukla y col., 2022). De acuerdo con el contexto de producción eléctrica en México, somos un país altamente dependiente del uso de combustibles fósiles, ya que su producción eléctrica depende del 86.9% de combustibles de origen fósil, 2% nuclear y 10.3% de fuentes renovables, lo que para el año de 2020 llevó a México a ser el responsable del 1.2% de las emisiones totales del mundo como se muestra en la **Figura 2** (CENACE, 2022). Esto puede parecer un número pequeño, pero en realidad, de acuerdo con Naciones Unidas (2022), estamos dentro del grupo de los 20 países (Alemania, Arabia Saudita, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, China, Estados Unidos, Francia, India, Indonesia, Italia,



Japón, República de Corea, México, Rusia, Reino Unido, Sudáfrica y Turquía) que son los responsables del 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero mundiales.



**Figura 1.** Producción Eléctrica Mundial elaborada con datos de Shukla y col. (2022).

Una solución prometedora es apostar por fuentes renovables, debido a que están disponibles en la naturaleza, como el sol, el viento, el agua, los residuos o el mismo calor de la Tierra, que se renuevan por la propia naturaleza y emiten pocas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 2022). A pesar de su enorme potencial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, las fuentes de energía renovable presentan limitaciones técnicas relevantes, especialmente debido a su carácter intermitente. Por ejemplo, la generación solar depende exclusivamente de la disponibilidad de luz diurna y de condiciones climáticas favorables, mientras que la generación eólica está sujeta a

variaciones impredecibles en la velocidad del viento, como se muestra en la **Figura 3** siendo un día nublado en un parque solar fotovoltaico o un día sin viento en donde no se mueven los aerogeneradores en un parque eólico. Esta naturaleza variable puede provocar desajustes entre la generación y la demanda de energía, comprometiendo la estabilidad del sistema eléctrico (Suraparaju y col., 2025).

Además, aunque el impacto ambiental de las energías renovables es significativamente menor en comparación con los combustibles fósiles, no están exentas de externalidades ecológicas que deben ser gestionadas cuidadosamente. Las plantas de biomasa, por ejemplo, pueden emitir dióxido de carbono durante su operación; los aerogeneradores pueden alterar el paisaje y afectar a la biodiversidad, especialmente a ciertas especies de aves; y la construcción de centrales hidroeléctricas puede modificar ecosistemas acuáticos y terrestres, afectando negativamente a la vida silvestre (Pacesila y col., 2016).

Para hacer frente a estas limitaciones, se han desarrollado estrategias como los sistemas híbridos, que combinan múltiples fuentes renovables con tecnologías de almacenamiento de energía. Entre las

opciones más relevantes se encuentran las baterías de alta capacidad, los sistemas de almacenamiento por bombeo hidráulico y las tecnologías basadas en hidrógeno. Estas soluciones permiten almacenar el excedente energético generado durante los períodos de alta producción y liberarlo durante los picos de demanda, lo que contribuye a garantizar un suministro más estable, continuo y confiable (Ang y col., 2022; Suraparaju y col., 2025).



**Figura 2.** Producción Eléctrica en México elaborada con datos de CENACE (2022).

## 2. Metodología

El presente documento fue elaborado a partir de una revisión documental y exploratoria de fuentes científicas, institucionales y técnicas, centradas en la energía nuclear, los Reactores Modulares Pequeños (RMP) y su papel en la transición energética. La metodología se basó en la recopilación, comparación y síntesis de información publicada entre 2010 y 2025.



**Figura 3.** Intermitencia de energía solar y eólica.

La búsqueda de información se llevó a cabo en bases de datos científicas como *ScienceDirect*, *SpringerLink* y *Google Scholar*, así como en informes técnicos emitidos por organismos especializados, tales como la *International Atomic Energy Agency* (IAEA), la *International Energy Agency* (IEA), la *World Nuclear Association* y la *International Renewable Energy Agency* (IRENA). La revisión se enfocó en los siguientes ejes temáticos:

- Estado actual y potencial de los Reactores Modulares Pequeños (RMP).
- Comparaciones técnicas y operativas con otras tecnologías energéticas.
- Desafíos asociados a la gestión de residuos nucleares.
- Indicadores clave como capacidad instalada, tiempos de construcción, disponibilidad y emisiones.

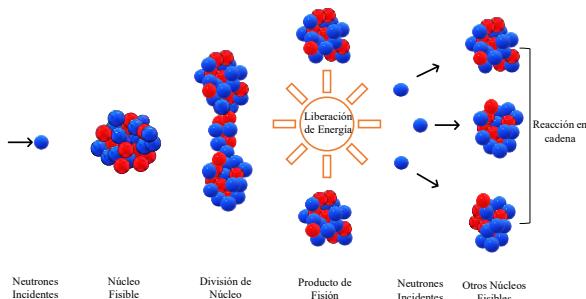
Asimismo, se incorporaron referencias cruzadas y datos comparativos con el objetivo de ofrecer una perspectiva técnica, contextualizada y equilibrada. Se procuró mantener el rigor informativo sin comprometer la claridad, facilitando la comprensión del contenido a lectores no especializados interesados en temas de energía y sostenibilidad.

### 3. Energía Nuclear y Reactores Modulares Pequeños: Complemento para una Transición Energética Sostenible

Además de la reducción de emisiones, la transición energética busca que el suministro de energía sea estable y confiable, y ante la intermitencia que presentan las fuentes renovables, es necesario explorar fuentes que puedan complementar este tipo de tecnologías. Con base en lo anterior, una alternativa que sirva de soporte a estas fuentes cuando no están disponibles es el uso de la energía nuclear, debido a que es baja en emisiones de gases de efecto invernadero y opera de manera continua, lo que representa un suministro de energía seguro.

La producción de energía eléctrica a partir de la energía nuclear se lleva a cabo por medio de un proceso llamado fisión nuclear, el cual consiste en que el núcleo de un átomo se

divide en dos o más núcleos pequeños y, a su vez, genera una gran cantidad de energía en forma de calor como se muestra en la **Figura 4**. De manera similar a los combustibles fósiles, este calor se aprovecha para producir energía eléctrica (Galindo, 2022).



**Figura 4.** Fisión Nuclear (elaborada con datos de Galindo, 2022).

Todo esto se produce en centrales nucleares que tienen una gran capacidad para producir energía eléctrica, sin embargo, son plantas demasiado grandes que necesitan una gran extensión de tierra para ser instaladas, así como grandes volúmenes de agua para su operación. El tipo de combustible más utilizado para la fisión nuclear es el Urano, que es un metal pesado débilmente radioactivo que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre (IAEA, 2020). De igual forma que otros elementos químicos, el uranio tiene tres isotopos, esto se refiere a que comparten propiedades químicas, pero cuentan con diferencias en su masa y propiedades físicas.

Estos isótopos son el uranio 234 (U 234), el uranio 235 (U 235) y el uranio 238 (U 238), donde el U 238 constituye el 99% del uranio natural del planeta, mientras que para el caso del U 235 corresponde el 0.72% del uranio en su estado natural, donde este es empleado en reactores nucleares como combustible. Por lo que, es necesario aumentar la concentración de U 235 mediante un proceso llamado enriquecimiento donde se puede llevar desde el 0.72%, hasta un máximo de 94%, donde para la mayoría de los reactores nucleares emplean el combustible con una proporción de U 235 menor el 20% denominado uranio poco enriquecido (Tarakanov, 2023).

¿Sabías que los reactores nucleares ya no tienen que ser gigantes para generar electricidad? Cuando se habla de energía nuclear, lo primero que viene a la mente son las grandes centrales nucleares; sin embargo, existe un nuevo tipo de tecnología nuclear llamada “Reactores Modulares Pequeños” por sus siglas RMP, que son reactores nucleares con una capacidad de hasta 300 MW(e), que utilizan uranio poco enriquecido como combustible la producción eléctrica también se hace por medio de la fisión nuclear, lo cual representa un tercio de la capacidad de generación de los reactores convencionales. Estos reactores son de suma

importancia, debido a que pueden producir grandes cantidades de electricidad para satisfacer las necesidades del día a día y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (IAEA, 2024).

Los RMP pueden resultar especialmente útiles debido a ciertas características específicas, como la seguridad pasiva, que les permite apagarse y enfriarse automáticamente en caso de cualquier eventualidad. También cuentan con modularidad, es decir, estos reactores se ensamblen en fábricas y se transportan completamente armados al lugar donde funcionará (Cooper, 2014). A diferencia de sus versiones de mayor tamaño, los grandes reactores nucleares convencionales se diseñan específicamente para un sitio en particular, lo que puede ocasionar retrasos en su construcción. El tiempo estimado de construcción de una central nuclear convencional suele oscilar entre 5 y 7 años, mientras que, en el caso de un RMP, se prevé un periodo aproximado de 18 meses (Carless y col., 2016). Con los RMP, se pueden ahorrar costos y reducir tiempos de construcción, además de que su potencia puede ajustarse según la demanda de energía. Y también, en comparación con los grandes reactores, los RMP necesitan recargar combustible con una

frecuencia de 3 a 7 años, mientras que los convencionales necesitan entre 1 a 2 años para recargar combustible (Liou, 2024).

Además, existen diseños que pueden funcionar durante 30 años sin necesidad de recargar combustible (Liou, 2024). Este tipo de reactores también pueden complementar a las energías renovables, ya que pueden operar en conjunto con estas, brindando estabilidad y respaldo a dichos sistemas energéticos (Gerasimovski & Chingoski, 2022). Por otro lado, con base en lo mencionado anteriormente, los RMP permiten esa flexibilidad al poder instalarse en lugares remotos donde no se tenga acceso a servicios eléctricos estables, así como no necesitan grandes extensiones de superficie para su instalación, en comparación con tecnologías renovables como la eólica o solar, o plantas nucleares convencionales. A continuación, se presenta la Tabla 1, la cual resume de manera comparativa los aspectos más relevantes de cinco tecnologías de generación eléctrica: RMP, Reactores Nucleares Convencionales (RNC), energía solar/eólica, geotérmica e hidroeléctrica.

El primer RMP del mundo comenzó a operar comercialmente en el año de 2020 con la central nuclear de *Akademik Lomonosov*, ubicada en la costa ártica de Rusia. Esta

central cuenta con dos unidades de 35 MW(e), que generan suficiente energía eléctrica para abastecer una ciudad de 100,000 habitantes. Por otro lado, no solo se usa para producir energía eléctrica, sino que también se emplea para desalinizar agua, permitiendo producir 240,000 metros cúbicos de agua potable al día (IAEA, 2020). Esto demuestra que este tipo de reactores no solo tiene un único uso, sino que también se puede utilizar como una planta desalinizadora para producir agua potable, así como también para la producción de químicos como el hidrógeno.

Con base en lo mencionado anteriormente, esto puede presentarse como una propuesta para México, que en términos de electrificación, presenta una cobertura muy alta, con un 99.1 % de los hogares con acceso a electricidad. Sin embargo, aproximadamente el 12 % de los hogares aún utilizan biomasa tradicional como combustible para cocinar o calentar, lo que contribuye a que alrededor del 36.7 % de los hogares en el país se encuentren en situación de pobreza energética. Esto significa que aproximadamente 46.6 millones de mexicanos no tenían acceso a electricidad o combustibles (de Buen y col., 2022).



**Tabla 1.** Comparativa técnica y operativa de los RMP, Reactores Nucleares Convencionales y Fuentes Renovables (IAEA, 2023; IEA, 2025; IRENA, 2025; TRVST, 2021; World Nuclear Association, 2020).

Parámetro	RMP	RNC	Solar / Eólica	Geotérmica	Hidroeléctrica
Capacidad por unidad	10 – 300 MWe	700 – 1600 MWe	Solar: 0.1 – 0.5 MW Eólica: 2 – 8 MW	5 – 50 MWe (unidad típica)	10 – 1000+ MWe (planta)
Tiempo de construcción	3 – 5 años	8 – 12 años	1 – 3 años	4 – 7 años	5 – 10 años
Ubicación	Flexible, incluso zonas remotas	Requiere superficie amplia y agua	Flexible, según recurso solar/eólico	Requiere fuente geotérmica viable	Requiere ríos caudalosos o embalses
Emisiones CO <sub>2</sub>	Prácticamente nulas (ciclo completo)	Prácticamente nulas	Cero emisiones directas	Bajas emisiones (principalmente del pozo)	Muy bajas emisiones (material orgánico en descomposición en el embalse)
Disponibilidad energética	Alta, generación continua	Alta, generación continua	Intermitente	Alta, aunque depende de geología local	Alta y hidroeléctrica
Vida útil estimada	60 años	60 – 80 años	20 – 30 años	25 – 35 años	50 – 100 años
Dependencia tecnológica	Alta; necesita cadena nuclear y regulación	Muy alta; tecnología especializada y costosa	Media; mejora con almacenamiento y redes	Media; depende de perforación y manejo de fluidos	Media; infraestructura hidráulica de gran escala

A nivel regional, se estima que cerca de 20 millones de personas en América Latina carecen de acceso a electricidad (Alegre-Bravo y col., 2025). De acuerdo con datos de la CEPAL (2021), varios países de Centroamérica presentan rezagos importantes: en Guatemala, el 16.5 % de los hogares no tiene acceso a electricidad; en Panamá, el 14.8 %; en Nicaragua, el 14.3 %; en El Salvador, el 11.8 %; y en Honduras, el 9.6 %. La situación más crítica se registra en el Caribe, particularmente en Haití, donde solo el 45 % de la población dispone de acceso a electricidad.

Es en este contexto donde este tipo de reactores podría presentarse como una solución viable ante esta problemática. Tomando como referencia la central nuclear *Akademik Lomonosov*, su implementación en México sería viable en regiones de temperaturas extremas que estén aisladas, permitiendo el abastecimiento eléctrico para cubrir necesidades básicas como la cocción de alimentos, refrigeración, iluminación, calentamiento de agua, aire acondicionado y ventilación (Zarco, 2019).

Según el estudio de García-Ochoa y Graizbord (2016), los estados de Chiapas, Guerrero y Oaxaca presentan los índices más elevados de pobreza energética a nivel

doméstico, considerando variables como iluminación, acceso a medios de entretenimiento, calentamiento de agua, uso de estufas de gas o eléctricas, disponibilidad de refrigeradores eficientes y confort térmico. Estas entidades, además, registran niveles muy altos de rezago social. Por otra parte, datos del CONAHCYT (2022) indican que las zonas noreste, centro y sureste del país concentran la mayor cantidad de plantas generadoras a partir de combustibles fósiles, mientras que regiones como Sonora, Baja California y el Istmo de Tehuantepec se destacan por su potencial y aprovechamiento de fuentes solares y eólicas. En la **Figura 5** se presenta una propuesta preliminar para la posible implementación de Reactores Modulares Pequeños (RMP) en el territorio nacional.



**Figura 5.** Implementación de Reactores Modulares Pequeños (RMP) en México (elaborada con datos de CONAHCYT (2022) y García-Ochoa & Graizbord (2016)).

No obstante, los RMP enfrentan desafíos técnicos y operativos que siguen siendo objeto de investigación y desarrollo. Por ejemplo, al ser una tecnología que apenas está emergiendo, se encuentra en la necesidad de buscar inversores para poder desarrollar y desplegar la tecnología y para esto necesita un mercado seguro y que exista demanda en este producto, por lo que esto lleva a los inversores a dudar en si invertir o no en nuevas tecnologías. Por otra parte, uno de los principales obstáculos son las regulaciones, ya que estas fueron diseñadas para reactores nucleares convencionales y deben ser reevaluadas para los RMP. Aunque estos incorporan innovaciones tecnológicas, el propósito de la normativa sigue siendo el mismo: garantizar la protección de las personas y del medio ambiente, así como minimizar el riesgo de accidentes y emisiones radiactivas (IAEA, 2020). En la sección 4 se analizan aspectos técnicos clave para comprender el papel que pueden desempeñar los Reactores Modulares Pequeños (RMP) en el contexto energético actual, con énfasis en la gestión de residuos radiactivos y los requerimientos operativos y de insumos asociados.

La creciente demanda energética y la urgencia de reducir emisiones de gases de

efecto invernadero hacen indispensable una transición energética hacia fuentes que nos permitan satisfacer todas las necesidades de los procesos humanos haciendo uso de los recursos que tenemos disponibles, de manera que durante un periodo largo de tiempo mantengamos estos recursos sin agotarlos o no causemos daño al medio ambiente para así no comprometer a las generaciones futuras. El uso de energías renovables como la eólica, solar, hidroeléctrica, termoeléctrica, etc., es la mejor opción que debemos seguir por el hecho de que las tenemos disponibles en el ambiente y se renuevan de manera natural, que a comparación de las fuentes fósiles estás no se renuevan y su impacto ambiental es muy grave. Sin embargo, no podemos depender de una sola tecnología para satisfacer nuestras necesidades energéticas. Tecnologías como la eólica y la solar enfrentan el desafío de la intermitencia, lo que implica que en ciertos momentos no pueden generar electricidad. De manera similar, existen limitaciones asociadas a otras fuentes, como la imposibilidad de instalar una planta hidroeléctrica en regiones con escasez de agua.

#### **4. Aspectos técnicos y operativos de los Reactores Modulares Pequeños (RMP)**

Los Reactores Modulares Pequeños (RMP) representan una evolución tecnológica en el ámbito de la energía nuclear, con ventajas significativas en términos de seguridad, escalabilidad y adaptabilidad al sistema energético contemporáneo. En esta sección se abordan dos aspectos fundamentales: la gestión de residuos radiactivos y los requerimientos operativos de los RMP.

##### *4.1 Gestión de residuos nucleares*

Los RMP utilizan ciclos de combustible similares a los de los reactores convencionales, aunque adaptados a su menor escala y diseño modular. Por lo general, operan con recargas cada 18 a 24 meses. Sin embargo, algunos modelos desarrollados para ubicaciones remotas, como aplicaciones marinas o regiones aisladas, emplean uranio con un mayor grado de enriquecimiento (hasta el 20 % de U-235), lo que permite extender el ciclo operativo hasta por 10 años sin necesidad de recarga. La mayoría de los diseños actuales utilizan uranio poco enriquecido (entre 5 % y 20 % de U-235), aunque las propuestas de próxima generación contemplan combustibles

alternativos como uranio metálico, de carburo o nitruro, cuya adopción requerirá nuevas infraestructuras para su procesamiento y gestión posterior (IAEA, 2024).

Al igual que en los reactores de gran escala, los RMP enfrentan retos relevantes en la gestión de residuos nucleares, tanto en el manejo del combustible gastado como en el tratamiento de desechos secundarios derivados de la activación de materiales estructurales o la posible contaminación del circuito primario. Por ello, se requiere la implementación de estrategias integrales que abarquen el empaquetado, almacenamiento intermedio y disposición final, con el objetivo de garantizar el aislamiento seguro de los radionúclidos (Krall y col., 2022).

Un caso ejemplar de adaptación tecnológica es Finlandia, donde se propone aplicar el concepto de almacenamiento geológico profundo KBS-3V para los residuos generados por RMP. Este sistema consiste en encapsular el combustible en contenedores de doble barrera, con una estructura interna de hierro fundido y una externa de cobre resistente a la corrosión. Estos contenedores se colocan en perforaciones verticales dentro de formaciones geológicas estables, rodeadas de bentonita. La combinación de barreras físicas y químicas proporciona un aislamiento

eficaz a largo plazo, minimizando la posible migración de radionúclidos hacia el ambiente.

Dado que los RMP generan volúmenes de residuos menores y con características particulares, como un calor residual reducido, se analiza la viabilidad de implementar sistemas de gestión centralizados. No obstante, también se contemplan esquemas descentralizados o híbridos, dependiendo del número de unidades instaladas, la logística de transporte y la idoneidad geológica de los sitios. Además, en aquellos RMP que no emplean tecnologías de agua ligera, podría ser necesario aplicar pretratamientos específicos para el acondicionamiento de los residuos, lo cual refuerza la necesidad de adaptar los esquemas actuales de disposición final a los nuevos diseños (Keto y col., 2022).

#### *4.2 Insumos, operación y vida útil*

Los RMP tienen una vida útil estimada entre 30 y 60 años, y algunos modelos están diseñados para operar hasta una década sin recarga de combustible. Utilizan como combustible uranio enriquecido o torio, emplean moderadores como agua ligera o grafito, y sus sistemas de refrigeración pueden incluir agua, sodio líquido o sales fundidas. Estas configuraciones les permiten

alcanzar una alta eficiencia térmica y adaptarse a redes eléctricas de menor escala (IAEA, 2020).

Uno de los diseños más destacados es el reactor NuScale, un sistema modular que utiliza uranio enriquecido como combustible y agua ligera como moderador y refrigerante. Cada módulo tiene una capacidad de 77 MWe y puede operar con un factor de capacidad superior al 95 %. Su sistema de seguridad es completamente pasivo, permitiendo el apagado y enfriamiento automático sin intervención humana ni suministro eléctrico externo. La vida útil proyectada de la planta es de 60 años, con ciclos de recarga de combustible cada 21 meses (NuScale Power, 2025).

En relación con el uso de agua, los sistemas de enfriamiento de los RMP pueden adaptarse según la disponibilidad del recurso hídrico. El enfriamiento por recirculación mediante torres húmedas, que disipan calor por evaporación, es una opción común, aunque reduce la eficiencia térmica en aproximadamente un 3.5 %. En una planta nuclear típica de 1000 MWe, esto implicaría un consumo aproximado de 75 megalitros de agua por día, con pérdidas por evaporación entre 4 % y 5 %, equivalentes a entre 1.75 y

2.5 litros por cada kWh generado (World Nuclear Association, 2020).

Para los RMP diseñados por NuScale, se están considerando tres opciones de enfriamiento: húmedo, seco y mixto. Las plantas con enfriamiento por agua consumirían aproximadamente 740 galones por MWh, un valor comparable al de otras tecnologías termoeléctricas. No obstante, incluso utilizando sistemas húmedos, una planta RMP de 720 MWe tendría un consumo anual de agua significativamente menor al de una planta nuclear convencional, gracias a su menor escala (Idaho National Laboratory, 2023).

## 5. Conclusiones

Se necesitan explorar otro tipo de tecnologías que permitan complementar a todas estas fuentes renovables tratando de hacer el menor uso posible de fuentes de origen fósil y optar por otras vías para así poder satisfacer las demandas energéticas y a su vez reducir los impactos ambientales. En ese sentido, los RMP surgen como una excelente opción, ya que combinan bajas emisiones, seguridad mejorada y flexibilidad en su instalación y operación. Su capacidad de suministrar energía en zonas aisladas, estabilizar redes eléctricas y apoyar procesos industriales,

como la desalinización, demuestra su versatilidad. México, al enfrentar altos niveles de pobreza energética, podría beneficiarse de la implementación de RMP para garantizar un acceso confiable a la electricidad, reducir su dependencia de combustibles fósiles y contribuir a los objetivos de reducción de emisiones globales. Sin embargo, esto no significa que los RMP constituyan la única ni la mejor solución a este problema. Se trata de una alternativa prometedora que requiere mayor desarrollo y cuya viabilidad en México aún debe ser evaluada mediante investigación adicional.

## Referencias bibliográficas

Alegre-Bravo, A., Stedman, R. C., & Anderson, C. L. (2025). Rethinking the role of indicators for electricity access in Latin America: Towards energy justice. *Applied Energy*, 379, 124877. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124877>

Ang, T.-Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabaharan, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>

Carless, T. S., Griffin, W. M., & Fischbeck, P. S. (2016). The environmental competitiveness of small modular reactors: A life cycle study. *Energy*, 114, 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.111>

CENACE. (2022, junio 1). *Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022–2036*. gob.mx. <http://www.gob.mx/cenace/documentos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2022-2036>

CEPAL. (2021). *Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe / Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. Recuperado 7 de junio de 2025, de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47216-desarrollo-indicadores-pobreza-energetica-america-latina-caribe>

CONAHCYT. (2022). Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad. *Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad*. <http://energia.conahcyt.mx/planeas>

Cooper, M. (2014). Small modular reactors and the future of nuclear power in the United States. *Energy Research & Social Science*, 3, 161–177. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.07.014>

de Buen, O., Morales, N., & Navarrete, J. I. (2022). *Servicios energéticos, pobreza energética y eficiencia energética: Una perspectiva desde México*.

Galindo, A. (2022, noviembre 15). *What is nuclear energy? The science of nuclear power* IAEA. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power>

García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, sociedad y territorio*, 16(51), 289–337.

Gerasimovski, V., & Chingoski, V. (2022). Small modular nuclear reactors—New perspectives in energy transition. *Balkan Journal Applied Mathematics and Informatics*, 5(2), 107–116. <https://doi.org/10.46763/BJAMI>

IAEA. (2020, septiembre 1). *Nuclear power and the clean energy transition*. IAEA. <https://www.iaea.org/bulletin/61-3>

IAEA. (2020). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (No. Text; pp. 1-339). International Atomic Energy Agency.

[https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)

IAEA. (2023, septiembre 13). *What are Small Modular Reactors (SMRs)?* | IAEA. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

IAEA. (2024). Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024. En *Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024* (pp. 1-48) [Text]. International Atomic Energy Agency. <https://doi.org/10.61092/iaea.3o4h-svum>

Idaho National Laboratory. (2023). *FAQs Carbon Free Power Project*. Idaho National Laboratory. Recuperado 6 de junio de 2025, de <https://inl.gov/trending-topics/faqs-carbon-free-power-project/>

IEA. (2025). *Electricity—Energy System*. IEA. <https://www.iea.org/energy-system/electricity>

IRENA. (2025). *Technology*. Recuperado 6 de junio de 2025, de <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology>

Keto, P., Juutilainen, P., Schatz, T., Naumer, S., & Häkkinen, S. (2022). *Waste Management of Small Modular Nuclear*

*Reactors in Finland*. VTT Technical Research Centre of Finland.

Krall, L. M., Macfarlane, A. M., & Ewing, R. C. (2022). Nuclear waste from small modular reactors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(23), e2111833119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>

Liou, J. (2024, agosto 28). *¿Qué son los reactores modulares pequeños (SMR)?* IAEA.

<https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>

Naciones Unidas. (2025). *Net Zero Coalition* | Naciones Unidas. United Nations. Recuperado el 24 de febrero de 2025, de <https://www.un.org/es/climatechange/net-zero-coalition>

Naciones Unidas. (2022, mayo 1). *Energías renovables: Energías para un futuro más seguro* | Naciones Unidas. United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

NuScale Power. (2025). *The NuScale Power Module* | NuScale Power. Recuperado 6 de junio de 2025, de <https://www.nuscalepower.com/products/nuscale-power-module>

Pacesila, M., Burcea, S. G., & Colesca, S. E. (2016). Analysis of renewable energies in European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 156-170. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.152>

Shukla, P. R., Skea, J., Reisinger, A., & IPCC (Eds.). (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. IPCC.

Suraparaju, S. K., Samykano, M., Vennapusa, J. R., Rajamony, R. K., Balasubramanian, D., Said, Z., & Pandey, A. K. (2025). Challenges and prospectives of energy storage integration in renewable energy systems for net zero transition. *Journal of Energy Storage*, 125, 116923. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116923>

Tarakanov, V. (2023, septiembre 15). *¿Qué es el uranio?* IAEA. <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-el-uranio>

TRVST. (2021). *What Are the Environmental Impacts of Hydropower?* TRVST. <https://www.trvst.world/renewable-energy/environmental-impacts-of-hydropower/>

World Nuclear Association. (2020). *Is the Cooling of Power Plants a Constraint on the Future of Nuclear Power?* - World Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/our-association/publications/technical-positions/cooling-of-power-plants>

World Nuclear Association. (2020). *Reactor Database Global Dashboard*—World Nuclear Association. Recuperado 6 de junio de 2025, de <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/summary>

Zarco, J. (2019, febrero 27). Pobreza energética. *pv magazine* México. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2019/02/27/pobreza-energetica/>