

Reactores nucleares modulares de Generación IV: una ruta hacia la transición energética

Alejandría Denisse Pérez Valseca
Área de Ingeniería en Recursos Energéticos,
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa



Abstract

Currently, 80% of the energy in the world is generated from using systems based on fossil fuels, producing large amounts of emissions into the atmosphere, and contributing unfavorably to the Climate Change. Starting in 2015, with the Paris Agreement, several countries committed to undertaking strategies to work towards a sustainable future with low carbon emissions. A strategy to meet this objective is the Energy Transition, where it is proposed to migrate from conventional energy generation sources to alternative sources. In this sense, nuclear energy aims to be a great alternative in the Energy Transition, since it does not produce polluting emissions during its operation, and new technological designs, such as Small Modular Reactors and Generation IV reactors, allow a progressive and accessible change from the energy matrix.

Keywords: Energy transition, Small Modular Reactors, Nuclear Energy, Clean energy.

Resumen

Actualmente, el 80% de la energía del mundo se genera a partir del uso de sistemas basados en combustibles fósiles, produciendo grandes cantidades de emisiones a la atmósfera y contribuyendo desfavorablemente al Cambio Climático. A partir de 2015, con el Acuerdo de París, diversos países decidieron comprometerse a adoptar estrategias para trabajar por un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono. Una estrategia para cumplir este objetivo es la Transición Energética, donde se propone migrar de fuentes convencionales de generación de energía a fuentes alternativas. En este sentido, la energía nuclear aspira a ser una gran alternativa dentro de la Transición Energética, ya que

no produce emisiones contaminantes durante su operación, y los nuevos diseños tecnológicos, como los Pequeños Reactores Modulares y los reactores de Generación IV, permiten un cambio progresivo y accesible desde la matriz energética.

Palabras clave: Transición energética, Reactores Modulares Pequeños, Energía Nuclear, Energía limpia

¿Te imaginas un día sin electricidad?

Pensar en nuestro actual ritmo de vida sin electricidad no es sencillo, la mayoría de las actividades que realizamos requieren de esta fuente de energía, y si se considera que el consumo de energía va de la mano con el crecimiento poblacional se puede deducir que, la cantidad de energía requerida para satisfacer la demanda energética va en aumento.

La energía ha estado presente en la humanidad desde los inicios de la historia, el descubrimiento del fuego fue un importante cambio, ya que les permitió a los seres humanos calentarse, cocinar alimentos y poder iluminarse en la oscuridad, dando un gran salto en la evolución social. Esto continuó durante muchos siglos, incrementando las aplicaciones del fuego, además de usar la energía mecánica en los molinos o en los cultivos. Pero no fue, sino hasta 1769, que se dio otro cambio importante en el uso de la energía, cuando James Watt inventó la máquina de vapor.

Durante 1780 a 1850, periodo en que duró de la Revolución Industrial, se dieron muchos avances en la ciencia y la tecnología, las aplicaciones de la máquina de vapor se extendieron por el mundo, incrementando los sistemas productivos y de transporte.

No obstante, no se tenían contempladas las consecuencias de la quema de combustibles utilizados para generar energía y producir el vapor.

Otro invento que revolucionó el uso de la energía fue la bombilla, cuya invención se le atribuye a Thomas Alva Edison, quien, en octubre de 1879 mostró la primera bombilla incandescente. Las bombillas utilizan electricidad para funcionar, por lo que Edison estuvo muy involucrado en la invención de los sistemas de generación eléctrica. En 1881, en la ciudad de Manhattan, Alva Edison y su compañía “*Illuminating Company*” presentaron la primera central termoeléctrica de los Estados Unidos de América, inicialmente tenía un generador eléctrico de corriente continua y utilizaba carbón como combustible, proporcionando electricidad para encender 400 lámparas incandescentes.

Después de esta invención, el desarrollo de las centrales termoeléctricas fue en crecimiento, utilizando combustibles fósiles en su operación. Durante ese tiempo, se desconocían las consecuencias que la quema de carbón y petróleo generarían. Durante el 2022, en el mundo se suministraron alrededor de 500 millones de TJ de electricidad usando fuentes no renovables (petróleo, carbón y gas natural), lo cual es el 80% del total suministrado (620 millones de TJ), el resto fue generado a partir de fuentes alternas, como solar, hidroenergía, eólica, geoenergía, biocombustibles y nuclear (Figura 1).

Como se mencionó, el aumento en el suministro de energía esta relacionado directamente con el crecimiento poblacional, en 1998 la población mundial era de 5.8 miles de millones de personas demandando una cantidad de energía alrededor de 400 millones de TJ, y a mediados de noviembre

de 2022, la Organización de las Naciones Unidas reportó que la población alcanzó 8 miles de millones de personas, las cuales demandaron 620 millones de TJ.

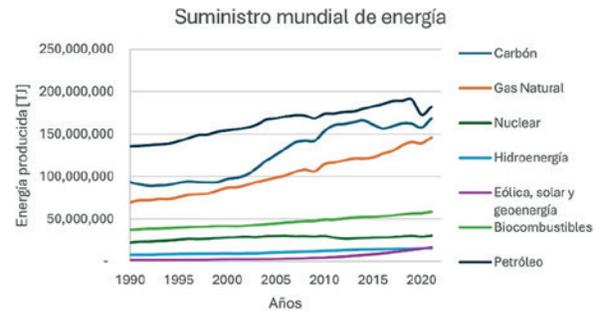


Figura 1. Suministro mundial total de energía por fuente de generación (IEA, 2022).

Así mismo, las emisiones de CO₂, están relacionadas con la demanda de energía y el crecimiento poblacional, en la Figura 2, se presenta el comportamiento de la cantidad total de CO₂ emitido a la atmósfera a nivel mundial, la cual ha ido en aumento. Para 2022, la cantidad total de emisiones fue de 34 mil megatoneladas y se espera que siga creciendo a la misma medida que la población y la demanda energética crecen. De acuerdo con IRENA (2021), en 2050 la electricidad será la principal forma de consumo de energía, pasando de un 21% del consumo total de energía final en 2018 a más del 50% en 2050.

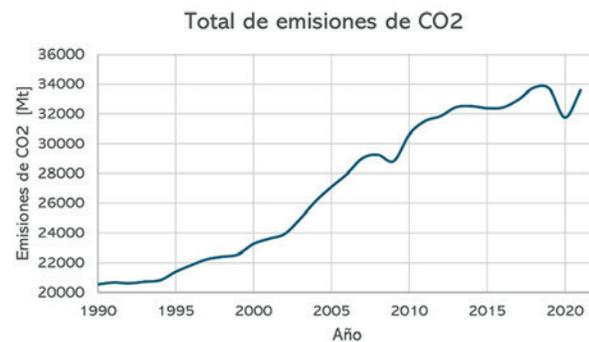


Figura 2. Emisiones de CO₂ generadas a nivel mundial (IEA, 2022).

Pensando en esto, ha sido necesario implementar medidas para reducir la generación de emisiones a la atmósfera, dando lugar al desarrollo de fuentes alternas de generación eléctrica (nuclear, solar, hidroenergía, eólica, biomasa, geotermia, hidrógeno, etc.), las cuales llevan décadas de investigación y desarrollo. Como se observa en la Figura 1, las fuentes alternas han ido en aumento en la generación de electricidad, y en la última década, a partir de la preocupación por disminuir el cambio climático, se ha establecido una estrategia para incrementar su uso, esta estrategia es la Transición Energética.

¿Qué es la Transición Energética?

Es un cambio progresivo en la forma en que se produce la electricidad, es decir, es realizar un cambio en la matriz energética actual. Este cambio implica migrar de las fuentes convencionales que emiten gran cantidad de contaminantes durante su uso hacia las energías alternas o limpias, es decir, que no emiten contaminantes.

El proceso de transición energética se enfoca en establecer la mejor ruta para el cambio en la matriz de energía, considerando los principios de sustentabilidad. Es decir, aspectos ambientales, sociales, económicos y políticos. En el mundo, cada vez son más los países que se suman y se comprometen con estrategias de carbono neto cero, lo que indica un cambio importante en el proceso de transición energética y cambio climático.

La energía nucleoelectrónica, eólica, hidroeléctrica, solar, geotermia, bioenergía, oceánica, hidrógeno y la generada en centrales de cogeneración son consideradas energías limpias y deben ser consideradas en la transición energética.

Transición energética en México

En nuestro país, la Ley de Transición Energética se publicó el 24 de diciembre de 2015, en la que se establece la regulación para el aprovechamiento de la energía de una manera sustentable. También establece las obligaciones de la Industria Eléctrica en materia de Energías Limpias, así como de reducción de emisiones contaminantes. En esta Ley se estableció una meta de usar un mínimo de 35% de Energías Limpias en la generación de energía eléctrica para el 2024, incluyendo dos metas intermedias: 25% para el 2018 y el 30% para el 2021.

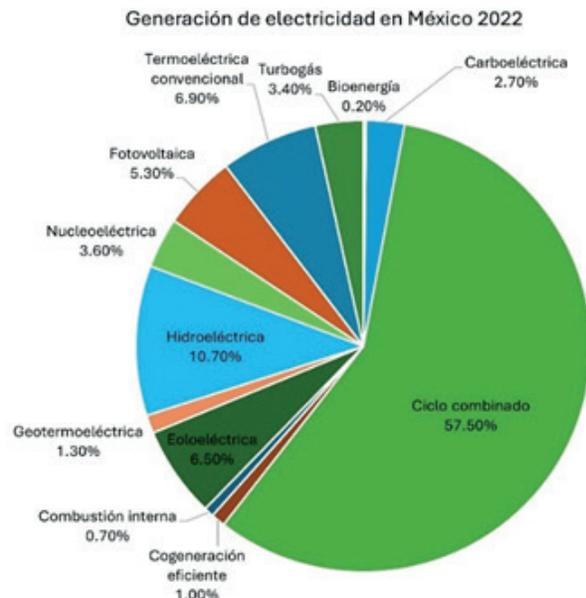


Figura 3. Generación eléctrica por fuente en México (IEA, 2022).

Además, México firmó el Acuerdo de París, comprometiéndose a llevar a cabo acciones para mantener el aumento de temperatura global por debajo de los 2°C grados centígrados, con un modelo de desarrollo sostenible, así como de bajas emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Para el 2022, en México, las tecnologías de generación que hacen uso de combus-

tibles fósiles produjeron el 72.4% del total de electricidad (Figura 3). La participación de las energías limpias es del 37.6%, en donde se incluyen hidroeléctrica, eololéctrica, geotérmica, nucleoléctrica, fotovoltaica y bioenergía.

De acuerdo con la actual matriz energética, la mayor parte de la generación eléctrica en México produce emisiones atmosféricas contaminantes y contribuye desfavorablemente al cambio climático, por lo que es necesario transitar a una nueva matriz energética que cumpla con los objetivos de la sustentabilidad, sea accesible para toda la población y baja en emisiones de carbono.

Como parte de las energías limpias, se ha considerado a la energía nuclear como una ruta en el camino de la transición energética. En México, desde 1990 contamos con una central nuclear, la cual inició sus operaciones con un reactor nuclear y en 1995 se adicionó un segundo reactor.

Energía Nuclear en México	
1 central nuclear	Ubicación: Municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, Veracruz.
Central Nuclear de Laguna Verde (CNLV)	Genera 3.6 % de la energía total del país
2 reactores nucleares	Capacidad instalada de 1640 MWe
Reactores tipo BWR (Boiling Water Reactor)	Cada reactor genera 820 MWe
	Es administrada por la Comisión Federal de Electricidad

¿Qué es la energía nuclear?

Es la energía que se obtiene de los procesos de fisión de átomos pesados. La tecnología nuclear para generación eléctrica inició su investigación después de la segunda guerra mundial, cuando diversos países trabajaron para poder controlar la reacción de fisión en cadena.

Las reacciones de fisión se llevan a cabo en el núcleo de un reactor nuclear, y es

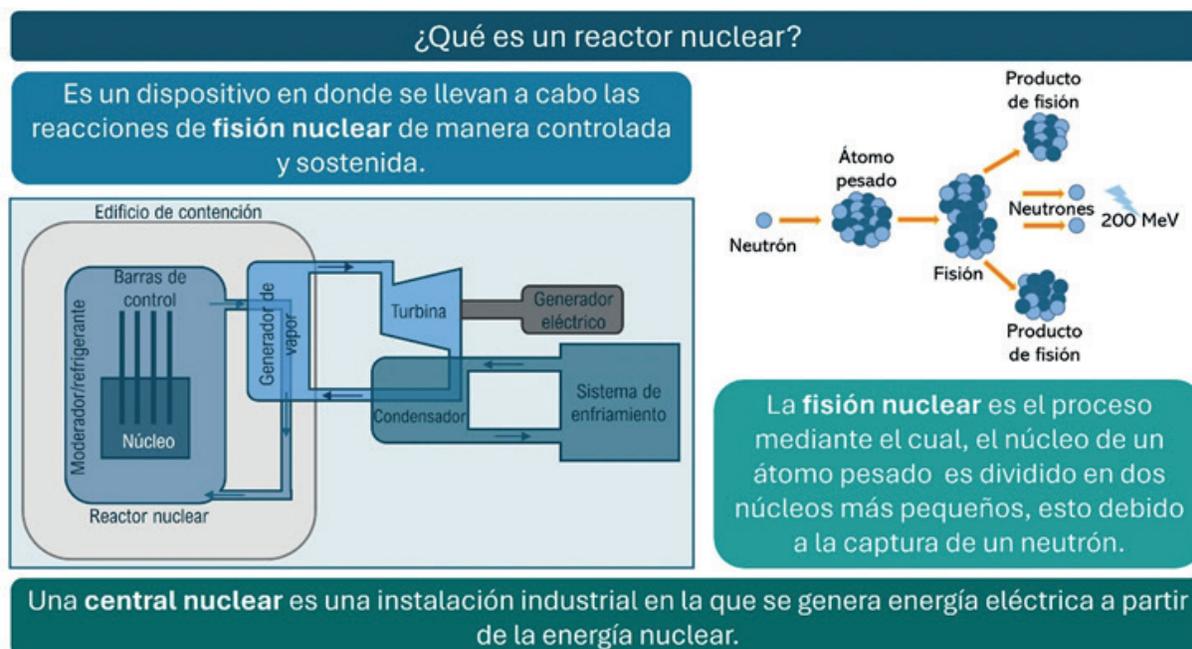
ahí donde se encuentra el combustible nuclear. La energía que se libera de los procesos de fisión se transforma en calor y es removida utilizando un refrigerante. Una vez que se remueve el calor, el refrigerante pasa a través de un generador de vapor, el cual será utilizado para mover una turbina y generar electricidad. Los reactores nucleares cuentan con sistemas para controlar las reacciones de fisión y a su vez la potencia, estos sistemas incluyen las barras de control y en algunos casos, sistemas pasivos.

El desarrollo de los reactores nucleares se ha dividido en cuatro generaciones, en la *Generación I* se establecieron los primeros reactores nucleares de experimentación. *La Generación II* inicia en 1970, cuando se construyen los primeros reactores comerciales para la generación de electricidad, se da un crecimiento comercial y es cuando se construyen diversas centrales nucleares a nivel mundial. El siguiente cambio se dio en la década de 1990, cuando los diseños fueron mejorados y se desarrollaron los reactores avanzados, formando la *Generación III*.

La Generación III+ surge a finales de la década de 2000, con un objetivo de desarrollar reactores con diseños evolutivos, que incluyan mejoras económicas, competitividad y menor tiempo de construcción. Por último, la *Generación IV* (GIV) también se estableció en la década de 2000, algunos de los diseños de esta generación ya se encuentran en operando y otros, se espera que comiencen a operar en el 2030.

¿Cómo se definen los reactores modulares?

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha definido a los reactores



modulares pequeños (SMR, por sus siglas en inglés) como reactores avanzados con capacidad instalada de hasta 300 MW eléctricos.

La mayoría de los diseños de SMR adoptan características de seguridad avanzadas y se pueden implementar como una planta de un solo módulo o de varios módulos.

De acuerdo con el sitio web ARIS (Advanced Reactor Information System) del Organismo Internacional de Energía Atómica, actualmente existen más de 80 diseños de SMR en desarrollo e implementación en el mundo. Y de acuerdo con su aplicación y características se clasifican en: a) pequeños reactores nucleares refrigerados con agua con base terrestre y base marítima, b) pequeños reactores modulares refrigerados con gas de alta temperatura, c) pequeños reactores modulares de espectro de neutrones rápidos enfriados con metal líquido, d) pequeños reactores modulares de sal fundida, e) micro reactores.

Dentro de esta clasificación, los reactores refrigerados con gas de alta temperatura, los reactores de espectro rápido y los de sal fundida, son reactores que pertenecen a la Generación IV. Los diseños de estos reactores ya deben cumplir con los objetivos establecidos por el Foro Internacional de GIV; economía, sustentabilidad, seguridad y no proliferación.

Dentro de los diseños de SMR de GIV se tienen el reactor HTR-PM, reactor de gas a alta temperatura desarrollado en China y conectado a la red en 2022; el reactor BREST-OD-300, diseño de neutrones rápidos enfriado con plomo, desarrollado por Rusia; el reactor sueco SEALER, también enfriado con plomo y espectro de neutrones rápidos. En el caso de los reactores de sales fundida, un ejemplo es el reactor Integral MSR, el cual es un diseño canadiense. Los micro reactores, cuya potencia máxima es de 10MWe, están siendo desarrollados en múltiples países y contemplan tecnologías de reactores avanzados.

Reactores modulares en la transición energética

La finalidad de la transición energética es cambiar la matriz actual a una que esté basada en fuentes de generación con nulas emisiones a la atmósfera. En ese sentido, es indispensable incluir a la energía nuclear en las estrategias para reducir los contaminantes en el aire. La energía nuclear no libera emisiones contaminantes en sus operaciones de rutina, a diferencia de las fuentes a base de quemar carbón, petróleo o gas. En un estudio de la Agencia Internacional de Energía en 2019, se analizaron datos sobre la producción histórica de energía, se determinó que, durante los últimos 50 años se habían evitado el equivalente a 60 mil millones de toneladas de dióxido de carbono gracias al uso de energía nuclear.

Los reactores pequeños modulares son una alternativa tecnológica que permitirá llevar a cabo la transición energética de manera flexible, descarbonizando diversos sectores productivos y generando electricidad libre de emisiones a la atmósfera. Los diseños de SMR de Generación IV se encuentran, en su mayoría, en desarrollo e investigación experimental, algunos diseños como el reactor de sales fundidas Integral MSR, desarrollado por la compañía canadiense Terrestrial, se encuentra en etapa de licenciamiento, así mismo, los reactores rápidos enfriados con plomo se encuentran en etapa experimental y licenciamiento en Rusia, China y Suecia. Los reactores enfriados con sodio han sido desarrollados principalmente por China y Francia. La estandarización de los SMR es de gran importancia, ya que facilitaría su implementación en las diversas aplicaciones, en este ámbito, el OIEA ha establecido grupos de trabajo enfocados en este tema.

Es importante resaltar que los SMR enfriados con agua, basados en tierra y marítimos,

Reactores de Generación IV

Ultima generación de reactores de fisión, en donde se incluyen seis diseños.

<https://www.gen-4.org/>

Reactor rápido enfriado con gas

Reactor rápido enfriado con plomo

Reactor enfriado con agua supercrítica

Reactor rápido enfriado con sodio

Reactor de sales fundidas

Reactor de muy alta temperatura

Los diseños de la Generación IV deberán cumplir con los siguientes objetivos:

- ✳ Utilizar el combustible de manera más eficiente.
- ✳ Reducir la producción de desechos.
- ✳ Ser económicamente competitivos.
- ✳ Cumplir estándares estrictos de seguridad y resistencia a la proliferación.

Reactores Modulares Pequeños

Diseños de Generación III/III+ y Generación IV.

Son reactores avanzados que producen máximo 300MWe.





Por su tamaño, pueden ser utilizados en barcos, industrias o comunidades alejadas de la red eléctrica.

Pueden ser construidos en fábricas, y, además, los SMR de baja potencia y microreactores, pueden ser transportados en tráiler o tren.



<https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors/>

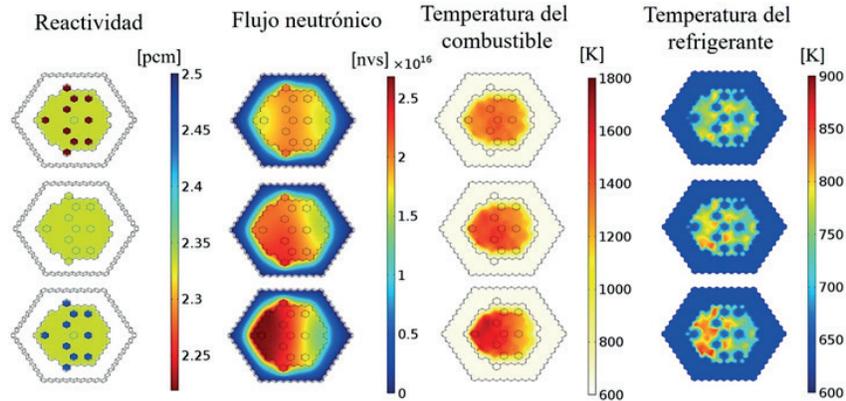


Figura 4. Perfil de flujo neutrónico, temperatura del combustible y temperatura del refrigerante para un SMR de espectro rápido enfriado con sodio.

ya se encuentran operando y algunos otros en etapa final de licenciamiento. Un claro ejemplo es el reactor NuScale, cuyo diseño y licenciamiento fue aprobado en 2020 en EUA.

¿Existen reactores modulares en México?

En nuestro país aún no existen reactores modulares. El desarrollo e investigación de los SMR sigue en proceso a nivel mundial, y se espera que en la siguiente década los primeros reactores SMR de Generación IV sean fabricados de manera modular, facilitando la incorporación a la red eléctrica nacional como parte de la transición energética.

En México, en diversas instituciones educativas del país, como la UAM, UNAM, el IPN y la UAZ, se ha trabajado en el desarrollo y estudio de las tecnologías nucleares, formando capital humano para la central nuclear de Laguna Verde, así como para trabajar en la industria y centros de investigación a nivel mundial.

En la Unidad Iztapalapa de la UAM, se encuentra el laboratorio de Análisis y Simulación de Reactores Nucleares, el cual es parte del Área Académica de Ingeniería en Recursos Energéticos. En este laboratorio

se ha desarrollado infraestructura computacional para el análisis y modelado de los reactores nucleares de Generación III, III+ y IV, y recientemente se ha iniciado el análisis de los reactores SMR.

El análisis de los reactores nucleares es de carácter multifísico y multiescala, ya que los fenómenos se presentan en diferentes partes del reactor y se encuentran altamente acoplados. Por ejemplo, un cambio en las condiciones del refrigerante impactará en los fenómenos neutrónicos, generando a su vez, un cambio en las el sistema de enfriamiento y la potencia del reactor, así como en el comportamiento de los sistemas estructurales y de control. Los estudios realizados para modelado y simulación de reactores nucleares incluyen el análisis de los fenómenos neutrónicos, los procesos de transferencia de calor en el combustible y el refrigerante, los procesos termo mecánicos en la pastilla de combustible y en los materiales estructurales.

En la Figura 4, se presentan los perfiles de flujo neutrónico y temperaturas del combustible y del refrigerante para un SMR enfriado con sodio. La reactividad, el cual es un parámetro que indica si está aumentando la cantidad de neutrones y por consecuencia

las fisiones en el reactor, ha sido modificada, esto con la finalidad de analizar el comportamiento del reactor en diversas condiciones, simulando eventos transitorios.

Al insertar reactividad positiva, el flujo neutrónico (cantidad de neutrones generados) aumenta, y con ésta también la potencia del reactor y la cantidad de energía en el núcleo, generando un aumento en la temperatura del combustible y del refrigerante. Conocer el valor de la temperatura en eventos transitorios permite estimar si los límites térmicos son respetados o si se sobrepasan, pudiendo generar un daño estructural y una situación de riesgo.

En el caso en el que se disminuye la reactividad, disminuye la potencia y la temperatura; si la temperatura del combustible disminuye mucho, la del refrigerante también lo hará, y si se considera un refrigerante como los metales líquidos (plomo y sodio) se debe tener cuidado de no sobrepasar la temperatura de solidificación. La complejidad del análisis de reactores nucleares convencionales y modulares se basa en entendimiento y modelado de los fenómenos presentes, así como su interacción. Los análisis y simulaciones se realizan en estados de operación normal del reactor, pero también se simulan eventos transitorios, que podrían derivar a un accidente, a esto se le conoce como análisis de seguridad.

Conclusiones

En México es importante considerar a los reactores nucleares modulares de Generación IV en la transición energética, por sus ventajas en diversas aplicaciones, así como versatilidad en su construcción y transportación.

Es importante destacar que la transición energética es progresiva, cambiando de

acuerdo con las posibilidades de los países y de la tecnología disponible, actualmente se busca aumentar la participación de la energía nuclear con los reactores y diseños existentes y, posteriormente, una vez que la tecnología de los SMR se encuentre aprobada, podrá ser incluida.

La transición energética es responsabilidad de los tomadores de decisiones de cada país, considerando sus recursos y políticas, no obstante, es responsabilidad de la sociedad tener un uso eficiente de la energía, disminuir la demanda y, de esta manera contribuir a la disminución de las emisiones a la atmósfera.

Referencias

IEA (2022). IEA World Energy Balances <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>

IAEA (2024A). ARIS - Advanced Reactors Information System. International Atomic Energy Agency. <https://aris.iaea.org/default.html>

IAEA (2024B). SMR – Small Modular Reactors. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

IRENA (2021). World Energy Transitions Outlook: 1.5°C. Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Sistema de Información Energética (SIE) (2022). Balance Nacional de Energía: Por fuente de energía primaria.

<https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnergía2022.pdf>