

# Estado actual y tendencias de la energía nuclear en las matrices energéticas de los países

Juan Carlos Olmedo Hidalgo<sup>1</sup>

## Resumen

La energía nuclear tiene una participación relevante en matriz energética global. Sin embargo, la tendencia en su uso está teniendo cambios relevantes en los distintos países que poseen dicha tecnología, identificando regiones con crecimiento de la flota y otros países que han decidido terminar con su uso. Se efectúa una revisión de las tendencias en la industria nuclear a nivel global y en los países de la región. Finalmente, se analiza los factores que inciden en su uso y los efectos sobre la seguridad y la defensa.

## Abstract

Nuclear energy has a significant role in the global energy matrix. However, the trend in its use is undergoing significant changes in different countries that possess this technology, with some regions experiencing fleet growth while other countries have decided to phase it out. This article reviews the trends in the global nuclear industry and in the countries of the region. Finally, it analyzes the factors that influence its use and its effects on security and defense.

## Introducción

Con posterioridad a la Segunda Guerra Mundial, a partir de la década de 1950 la energía nuclear ha adquirido importancia significativa en el ámbito global y regional, muy enfocado

1 Teniente de Reserva, perteneciente a la Compañía "Capitán José Luis Araneda". Ingeniero Civil de Industrias de la Pontificia Universidad Católica de Chile, MBA de la Universidad Adolfo Ibáñez, Certificate in Management de Dardeen School of Business de la Universidad de Virginia. Se ha desempeñado en cargos ejecutivos y directivos en Chile y LATAM en mercados energéticos e infraestructura en desarrollo de proyectos e innovación, comercialización y políticas públicas. Ha sido asesor del Banco Mundial y USAID en política energética. Actualmente es presidente del Consejo Directivo de Coordinador Eléctrico Nacional. Es autor de artículos y libros en políticas públicas del sector energético.



### Palabras clave

Energía nuclear  
Cambio climático  
Transición energética  
Carbono neutralidad

### Keywords

Nuclear energy  
Climate change  
Energy transition  
Net zero emission



en sus usos pacíficos. Su continua evolución y su efecto en la industria energética, la seguridad, la defensa y el medioambiente, así como su papel en la transición energética hacia un futuro con nulas o bajas emisiones de carbono, la convierten en un tema de constante interés y debate.

La energía nuclear está calificada por la Agencia Internacional de Energía Atómica como una fuente energética sin emisiones de carbono, por lo que varios países la consideran dentro de sus estrategias de reducción de emisiones de carbono en sus matrices energéticas. Esto ha impulsado nuevos desarrollos tecnológicos, políticas e implicancias de la energía nuclear en un contexto global y regional.

Los factores que influyen en la adopción y el uso de la energía nuclear son variados, e incluso algunos países han decidido el cese de operaciones de sus centrales nucleares. En el caso de Sudamérica, Argentina es el país que ha adoptado la energía nuclear desde hace más de 30 años, generando capacidades para el desarrollo local de reactores.

En la medida que se amplía el uso de esta tecnología, la seguridad nuclear y los aspectos de defensa relacionados con ella, la energía nuclear surgen como un aspecto muy relevante en materias como las consideraciones sobre la no proliferación, la protección de instalaciones nucleares y la seguridad cibernética.

## 1. La núcleo-electricidad

El concepto de núcleo-electricidad, se refiere a la producción de energía eléctrica aprovechando como fuente energética el calor producido por un reactor nuclear, siendo considerada como una tecnología con nulas emisiones de carbono, lo

que le da un rol en el proceso de mitigación del cambio climático.

Un reactor nuclear funciona mediante el proceso llamado fisión, en el que una partícula o neutrón se dispara hacia un átomo, que luego se divide en dos átomos más pequeños y algunos neutrones adicionales. Algunos de los neutrones liberados luego chocan con otros átomos, haciéndolos también fisiónar y liberar más neutrones. Esto se llama una reacción en cadena. La fisión de átomos en el proceso de reacción en cadena libera una gran cantidad de energía en forma de calor, el calor generado se transfiere desde el reactor mediante un fluido refrigerante, usualmente agua, el que se utiliza para producir vapor, que impulsa turbinas para la producción de electricidad.

Para garantizar que la reacción nuclear se produzca a la velocidad adecuada, los reactores cuentan con sistemas que aceleran, ralentizan o detienen la reacción nuclear y con ello controlan el calor que produce. Esto se hace normalmente con varillas de control, que suelen estar hechas de materiales absorbentes de neutrones como la plata y el boro.

Los diseños de reactores nucleares tienen muchas variantes, algunos utilizan agua para enfriar su núcleo, mientras otros utilizan gas o metal líquido. Los tipos de reactores de energía más comunes utilizan agua, siendo más del 90% de los reactores del mundo basados en ella.

La experiencia de operación por más de 50 años en el mundo, ha demostrado que los reactores nucleares son muy confiables para generar electricidad y pueden funcionar las 24 horas del día durante extensos períodos, sin interrupciones, independientemente de las condiciones climáticas. Además, la mayoría de los reactores nucleares



tienen una vida útil larga, en muchos casos de más de 60 años. En el año 2019, las unidades 3 y 4 de la planta Turkey Point en Florida fueron de los primeros reactores en el mundo en recibir licencia para operar durante 80 años.

En los últimos años la energía nuclear en varios países se ha considerado como una opción para mitigar los efectos del cambio climático. Es así como en las próximas décadas se espera que su función sea multipropósito, en usos tales como: i) generación de electricidad; ii) cogeneración de electricidad y calor, iii) calefacción distrital y desalinización de agua; iv) utilización en redes aisladas; y v) producción de hidrógeno neutro en carbono.

Si bien, desde un punto de vista tecnológico la energía nuclear es vista como una opción viable, segura y confiable, la percepción de grupos de interés releva un conjunto de aspectos que generan oposición a su desarrollo, entre ellos se puede mencionar los siguientes:

- Seguridad nuclear y riesgo de accidentes: la ocurrencia de desastres nucleares pasados, como el caso de las plantas de Chernobyl (1986)<sup>2</sup> y Fukushima (2011),<sup>3</sup> han aumentado las preocupaciones sobre la seguridad de las

centrales nucleares y la gestión de desechos radiactivos. La posibilidad de la ocurrencia de accidentes nucleares graves y sus consecuencias potenciales en términos de salud pública y medioambiente genera preocupaciones. La percepción pública descrita de que la energía nuclear es peligrosa genera oposición, incluso si la tecnología ha avanzado en términos de seguridad.

- Residuos radiactivos: la generación y gestión de desechos radiactivos a largo plazo plantea preocupaciones sobre la contaminación y los riesgos para la salud que podrían ocasionar los sitios de acopio. La falta de soluciones seguras y confiables a largo plazo para la eliminación de residuos radiactivos genera oposición.
- Costos de inversión: la forma en que se han desarrollado las plantas de energía nuclear, con diseños específicos caso a caso, ha implicado altos costos construcción y operación. A su vez los costos de desmantelamiento y eliminación de residuos también son altos.
- Proliferación nuclear: la tecnología nuclear desde sus inicios se ha utilizado con fines militares, lo que plantea preocupaciones sobre la proliferación de armas nucleares en varias regiones del mundo. Adicionalmente, se plantean aspectos de la seguridad de almacenamiento del combustible nuclear y

2 El accidente de Chernobyl ocurrió el 26 de abril de 1986 en la planta nuclear de Chernobyl, ubicada cerca de la ciudad de Pripyat en Ucrania. El accidente se produjo durante una prueba de seguridad en el reactor número 4 de la planta mientras los operadores estaban realizando una prueba de seguridad que implicaba reducir la potencia del reactor a niveles muy bajos y evaluar cómo el reactor se comportaba en caso de un corte de energía eléctrica. Durante la prueba, se cometieron varios errores de operación y se violaron los procedimientos de seguridad, reduciendo la potencia a niveles peligrosamente bajos y se desconectaron sistemas de seguridad esenciales. Debido a la configuración del reactor y la falta de refrigeración, la potencia del reactor comenzó a aumentar de manera incontrolable, provocando una explosión de vapor y la posterior fusión del núcleo del reactor, destruyendo el edificio del reactor y liberando material radiactivo al medioambiente a grandes distancias, cubriendo parte importante de Europa.

3 El accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi ocurrió en Japón en marzo de 2011, como resultado de un terremoto y un tsunami que inundó la planta nuclear, dañando las instalaciones eléctricas de la planta, incluyendo los generadores de emergencia que proporcionaban energía para enfriar los reactores nucleares. Esto provocó un aumento de la temperatura y la presión en los núcleos de los reactores. Así, los núcleos de tres de los seis reactores experimentaron una fusión parcial de sus núcleos, lo que resultó en la liberación de material radiactivo al medioambiente. Para aliviar la presión dentro de los reactores, se liberó hidrógeno, que se acumuló en los edificios de contención y causó explosiones de hidrógeno en los reactores 1, 3 y 4.



- los residuos de plutonio, los que podrían ser obtenidos ilícitamente por grupos terroristas.
- Impacto ambiental: aunque la energía nuclear no emite gases de efecto invernadero, todavía se asocia la minería de uranio por lo que tiene altos impactos ambientales, los que dicen relación con el potencial efecto en la contaminación del agua, al liberar sustancias químicas tóxicas que contaminan las aguas subterráneas y superficiales. Esto puede afectar los ecosistemas acuáticos y al suministro de agua. Además, la extracción y el procesamiento del uranio pueden generar polvo y emisiones radiactivas, lo que plantea preocupaciones en términos de exposición a la radiación y salud humana.
  - Riesgos para la salud: la exposición a partículas radiactivas y productos químicos en el lugar de trabajo o en las áreas circundantes puede plantear riesgos para la salud de los trabajadores y las comunidades cercanas a las minas de uranio.
  - Alternativas energéticas: algunas personas y líderes de opinión creen que existen alternativas más seguras y sostenibles a la energía nuclear, como la energía renovable.
  - Desconfianza en la industria nuclear: escándalos pasados como los ya mencionados u otros y preocupaciones sobre la falta de transparencia y supervisión en la industria nuclear han generado desconfianza. En las instituciones financieras y compañías aseguradoras ha existido reticencia al financiamiento y otorgamiento de seguros a este tipo de plantas.
  - Protestas y movimientos sociales: grupos y movimientos sociales han desempeñado un papel importante en la oposición a la

energía nuclear, organizando protestas y campañas en contra. En el caso de Alemania han logrado que el país implemente una política pública para el retiro de servicio de las plantas nucleares. En junio de 2011, el Bundestag<sup>4</sup> acordó eliminar, gradualmente la energía nuclear, mediante un proceso de retiro ordenado de las centrales e iniciar la búsqueda de un depósito final para los residuos radiactivos de alto nivel. Es así como las centrales nucleares de Grohnde, Gundremmingen C y Brokdorf se cerraron el 31 de diciembre de 2021 y, las tres últimas centrales nucleares de: Isar 2, Emsland y Neckarwestheim 2 cerraron el 15 de abril de 2023

Estos factores varían en importancia según la región y la percepción pública, siendo la oposición a la energía nuclear el resultado de una combinación de estos elementos. La discusión sobre la energía nuclear a menudo involucra un equilibrio entre sus beneficios potenciales en términos de generación de energía sin emisiones y su capacidad para reducir las emisiones de carbono, y las preocupaciones sobre la seguridad y los impactos sociales y medioambientales a largo plazo.

## 2. Tipos de reactores

### 2.1. Reactores enfriados por agua

Los reactores enfriados por agua han sido la tecnología dominante en la industria nuclear comercial desde sus inicios. Es así como, de los 442 reactores en funcionamiento actualmente en el mundo, el 96% son enfriados por agua.

---

4 Parlamento Federal de Alemania.



Muchas de estas plantas originalmente obtuvieron licencia para operar durante 40 años, pero debido a los avances en la experiencia de su uso, la vida de estas plantas se ha estado extendiendo a 60 años, con la posibilidad de operar aún más tiempo.

Los reactores de agua ligera (RAL) son los más comunes en todo el mundo y se dividen en dos tipos: reactores de agua a presión (RAP), que producen vapor para la turbina en generadores de vapor separados; y reactores de agua en ebullición (RAE), que utilizan el vapor producido dentro del núcleo del reactor directamente en la turbina de vapor. Todos los reactores RAL requieren combustible enriquecido en el isótopo fisible Uranio 235.

Por otra parte, los reactores de agua pesada utilizan agua "enriquecida", cuyas moléculas están compuestas en su mayoría por átomos de hidrógeno que constan de más del 99% de deuterio, un isótopo de hidrógeno más pesado. Esta agua pesada, es utilizada como moderador, mejora la economía general de neutrones, permitiendo el uso de combustible que no requiere enriquecimiento.

Los avances recientes en la tecnología de RAE incluyen mejoras en los diseños existentes y el desarrollo de otros nuevos, compartiendo los objetivos comunes de mayor seguridad, un uso más eficiente de los recursos y mejor competitividad económica.

Para mejorar la eficiencia térmica y la economía de las plantas, se está llevando a cabo una

investigación y desarrollo para Reactores de Vapor Supercrítico (RASC). El vapor supercrítico existe a temperaturas y presiones por encima del punto crítico del agua,<sup>5</sup> donde los estados líquido y gaseoso son indistinguibles. Se espera que las eficiencias de las plantas de RASC sean aproximadamente 1.3 veces más altas que las de los REA convencionales.

## 2.2. Reactores enfriados por gas

Estos reactores se utilizan actualmente solo en el Reino Unido. El interés en el desarrollo de este tipo de reactores enfriados por gas de alta temperatura está aumentando debido a que pueden producir electricidad a menor costo, así como producir calor de proceso a alta temperatura utilizable en diversas aplicaciones industriales.

Los reactores enfriados por gas representan actualmente aproximadamente el 3% del total en funcionamiento en todo el mundo. Estos son enfriados por dióxido de carbono y se estima que serán retirados gradualmente hacia el año 2025.

Aún existe interés en el desarrollo de reactores de gas de alta temperatura avanzados (HTGR) que utilizan helio como refrigerante. Estos reactores pueden lograr tasas de utilización de combustible muy altas y operar a altas temperaturas lo que aumenta su eficiencia. También pueden producir calor para procesos industriales, que se puede utilizar para la producción de hidrógeno y aplicaciones de baja temperatura, como desalinización de agua de mar y calefacción urbana.

---

5 El punto crítico del agua se alcanza al aumentar la presión y temperatura, tal que en ese punto la presión es incapaz de impedir la ebullición. Si la temperatura es superior a 374 °C el agua hierve y en este punto la presión es 221 veces superior a la presión atmosférica habitual.



### 2.3. Reactores rápidos

Se desarrollaron a partir del año 1960. Su ciclo de combustible cerrado puede disminuir la carga de los desechos nucleares. El espectro de neutrones rápidos permite que estos reactores aumenten considerablemente el rendimiento energético del uranio natural en comparación con los reactores térmicos. Esta alta utilización del combustible puede hacer más eficiente el uso del combustible nuclear y proporcionar mejoras significativas en la gestión de los desechos.

Los reactores rápidos son enfriados con sodio, plomo o plomo-bismuto, cumpliendo con estándares más altos de seguridad, sostenibilidad, economía y protección física. Además, se está desarrollando el reactor rápido de sal fundida como una opción a largo plazo. Como parte de la estrategia de la Unión Europea, el proyecto SAMOFAR (Evaluación de la seguridad del reactor rápido de sales fundidas) es uno de los principales proyectos de investigación e innovación en el programa de investigación de Euratom Horizonte 2020. El objetivo del proyecto es lograr un avance en la seguridad nuclear y en la gestión de los residuos nucleares para hacer que la energía nuclear sea realmente segura y sostenible.<sup>6</sup>

La tecnología de reactor rápido más madura es aquel enfriado con sodio, la que cuenta con una flota de más de 400 reactores-año de experiencia adquirida a través del diseño, construcción, operación y desmantelamiento de unidades experimentales, prototipos y comerciales que han operado en China, Francia, Alemania, India, Japón, la Federación Rusa, el Reino Unido y Estados Unidos.

### 2.4. Reactores de sales fundidas

Inicialmente fueron desarrollados en la década de 1950, los que tienen ventajas en términos de mayor eficiencia y menor generación de residuos. Los reactores de sal fundida (MSR), son considerados como una tecnología avanzada de alto potencial, ya que operan a temperaturas más elevadas, con lo que logran una mayor eficiencia en la generación de electricidad. Además, trabajan a menores bajas presiones de operación lo que reduce el riesgo de accidentes de filtraciones, mejorando así la seguridad del reactor.

Estos reactores pueden adaptarse a una variedad de ciclos de combustible nuclear, como los ciclos uranio-plutonio y torio-uranio, lo que permite mayor eficiencia en el uso de combustible. También pueden diseñarse como “quemadores” o reproductores de residuos nucleares. El calor generado a alta temperatura por los MSR puede utilizarse para la generación de electricidad y otras aplicaciones de calor de industrial.

### 2.5. Reactores medianos y pequeños

Los reactores pequeños y medianos (SMR) o los llamados reactores modulares son una opción para satisfacer la necesidad de generación de energía flexible para una amplia gama de usuarios y aplicaciones. Los modulares pequeños, instalables como plantas de módulos individuales o múltiples, ofrecen la posibilidad de combinar la energía nuclear con fuentes de energía renovables variables.

El interés mundial en los reactores pequeños y medianos ha venido en aumento debido a

---

6 SAMOFAR Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor - MSFR [en línea]. Disponible en: <http://samofar.eu/>



su capacidad para satisfacer la necesidad de generación de energía flexible para reemplazar a las plantas térmicas que utilizan combustibles fósiles. Dado que se instalarían masivamente, su seguridad se ha mejorado mediante características de seguridad inherentes y pasivas. Además, su costo de inversión se ha reducido, ofreciendo opciones para regiones remotas con infraestructura de transmisión menos desarrolladas y la posibilidad de implementar sistemas energéticos híbridos que combinan energía nuclear con fuentes de energías renovables y uso de calor para desalación de agua.

Muchos países se están enfocando en el desarrollo de reactores modulares pequeños y medianos, que se definen como reactores avanzados con potencia eléctrica de hasta 300 MW por módulo.

Hoy, existen alrededor de 50 diseños y conceptos de reactores modulares pequeños y medianos en todo el mundo. La mayoría de ellos se encuentran en diversas etapas de desarrollo y algunos se consideran desplegados a corto plazo. Actualmente, hay cuatro reactores modulares pequeños en etapas avanzadas de construcción en Estados Unidos, Argentina, China y Rusia.

### 3. Requerimientos para desarrollar núcleo-electricidad en un país

Desarrollar un programa para incorporar la generación núcleo-eléctrica a la matriz eléctrica de un país implica implementar una infraestructura que garantice que esta pueda operar de manera segura, de forma tal que el país sea habilitado por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) para este fin.

En el año 2007 este organismo elaboró una guía de los pasos a seguir para implementar matrices de núcleo-electricidad, la que consiste en tres etapas:

- Identificar los compromisos y obligaciones asociados a la introducción de la núcleo-electricidad.
- Establecer y preparar la infraestructura nacional necesaria para la construcción de una planta núcleoeléctrica.
- Generar las competencias y capacidades necesarias para regular y operar una planta nuclear de manera segura y eficiente durante toda su vida útil y para regular y administrar los residuos radiactivos.

Este proyecto de núcleo-eléctricidad tomaría entre 10 y 15 años en ser completado y llegar a la fase de operación comercial. La figura N° 1 muestra las etapas del proceso.

La primera etapa implica ejecutar las actividades previas a la decisión de desarrollar una planta generadora y concluye con el hito de acreditar que el país está preparado para tomar un compromiso sobre un programa núcleo-eléctrico.

Durante la segunda etapa el país debe efectuar las acciones necesarias para estar en condiciones de iniciar la construcción de una planta nuclear. Los principales requisitos en esta fase son:

- Instaurar un órgano regulador competente que pueda evaluar, supervisar y controlar eficazmente el proyecto;
- Desarrollar toda la infraestructura necesaria para poder requerir, recibir y seleccionar ofertas y establecer los contratos necesarios para su ejecución y operación.



La tercera etapa consiste en desarrollar todas las actividades para la construcción y operación de la primera central generadora. Esto implica desarrollar recursos humanos, infraestructura física

en hospitales, laboratorios, centros de entrenamiento, grupos Hazmat<sup>7</sup> y manejo de residuos, y la estructura organizacional y regulatoria de alto estándar en esta materia.

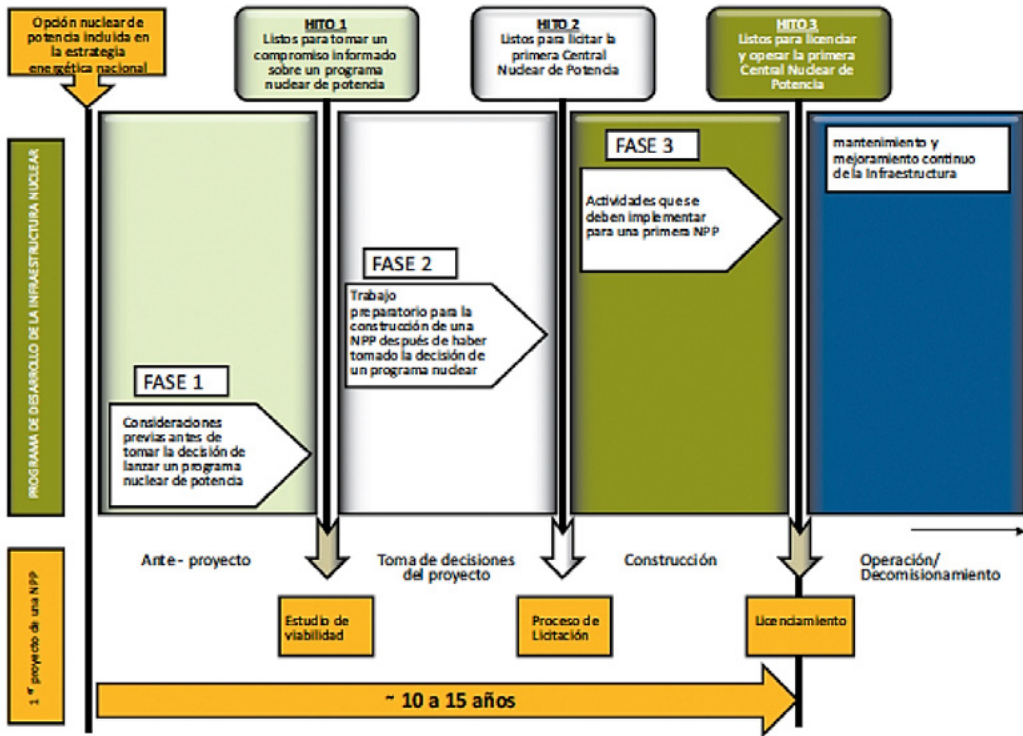


Figura Nº 1. Pasos para la implementación de núcleo de electricidad.

Fuente: Agencia Internacional de Energía.

Por lo tanto, previo a una decisión de inversión en una planta de generación nucleo-eléctrica se deben superar las brechas regulatorias y de infraestructura entre lo existente y lo requerido.

Actualmente (2023) Chile no cumple con los requisitos necesarios para implementar centrales

de núcleo-electricidad, por lo que no se encuentra preparado para incorporarla en su matriz eléctrica, aun cuando el país tiene experiencia operando reactores de investigación y ha desarrollado capacidades por más de 30 años en la materia. Su decisión de implementación es una materia de política pública, lo que en todo caso implicaría un plazo extendido para su ejecución.

7 El término "hazmat" o materiales peligrosos, se refiere a aquellos materiales que presentan un alto riesgo para la seguridad e integridad de las personas y el medioambiente.





## 4. Contexto actual de la núcleo-electricidad en el mundo

Al año 2022 la capacidad instalada en las centrales nucleares en el mundo alcanzó 414.100 MW, siendo los miembros del G7 y la Unión Europea los países con la mayor capacidad instalada de núcleo-electricidad en el mundo con 259.600 MW. China desde el año 2000 ha estado ampliando en forma sustancial su capacidad instalada en centrales nucleares, alcanzando una potencia instalada de 55.800 MW.<sup>8</sup> La mayoría de las plantas generadoras en estos países esta próxima a alcanzar los 60 años

de operación, acercándose al término de su vida útil. Las adiciones de capacidad nuclear crecieron un 40% en 2022, con 8.000 MW principalmente en China, Finlandia, Corea y Pakistán.

Además, muchos gobiernos están reconsiderando cómo la energía nuclear podría contribuir a su futuro energético, al igual que lo hicieron después de la crisis de precios del petróleo en la década de 1970. Por el contrario, en Europa, existe la decisión de disminuir la participación de la generación nuclear, principalmente por presiones de tipo social.

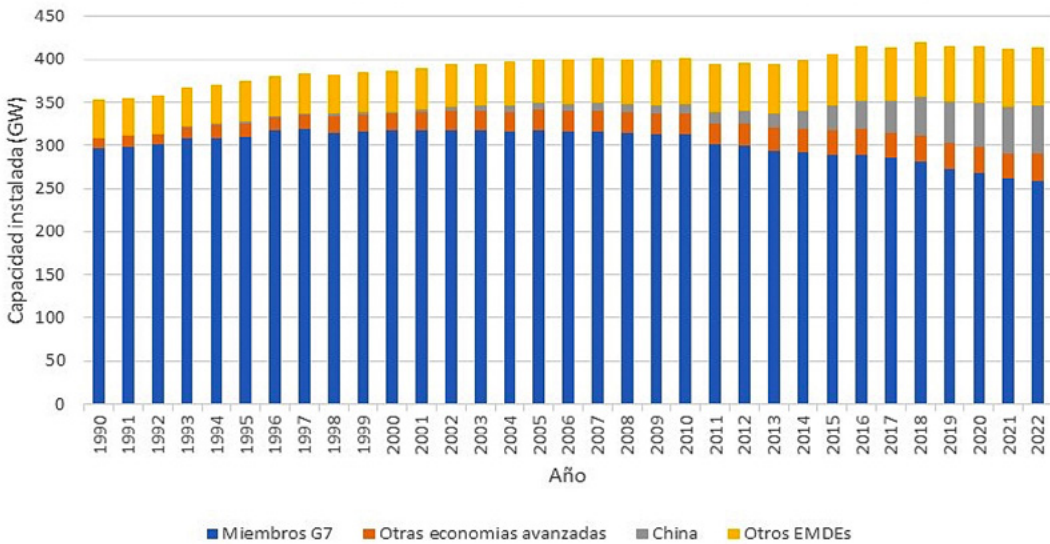


Gráfico N° 1. Capacidad instalada en centrales nucleares por región.

Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica, Julio 2023.

Se prevé que al 2040 la Unión Europea reducirá a un tercio la capacidad instalada de su flota de centrales núcleo-eléctricas. En el caso de Japón, el plan de revisión de las plantas nucleares debido al accidente de Fukushima ha demorado su

retorno a la operación, dejando dudas respecto de la decisión que adoptará el gobierno.

Respecto del desarrollo futuro, la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) prevé, que al año

8 Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/nuclear-power-capacity-by-country-or-region-in-the-net-zero-scenario-1990-2030-2>, IEA



2040 la generación de fuentes renovables será del orden de 60% y que la participación de generación nuclear será de 15% superando a las tecnologías con captura y secuestro de CO<sub>2</sub> que llegarían al 6%. Así, la IEA asigna un rol relevante para la nucleoelectricidad como una tecnología articuladora para alcanzar bajas emisiones de carbono. De esta manera, habría un incremento neto de 107.000 MW de capacidad instalada de generación nucleoelectrica, considerando un cambio sustancial en la localización de este tipo de plantas generadoras, desarrollándose el crecimiento principalmente en China e India.<sup>9</sup>

#### 4.1. La energía nuclear y la mitigación del cambio climático

La energía nuclear es una tecnología de bajas emisiones en el camino hacia las Emisiones Netas cero (NZE).<sup>10</sup> En particular, complementa y respalda el rápido crecimiento de las energías renovables para llevar las emisiones del sector eléctrico a nivel mundial a cero para 2040. En este contexto, la energía nuclear contribuye a la oferta de electricidad de bajas emisiones y, como fuente de generación gestionable, mejora la seguridad del suministro al proporcionar la adecuación y la flexibilidad del sistema. También permite continuar suministrando calor para redes de calefacción urbana y algunas instalaciones industriales.

La IEA ha identificado cinco características relevantes de la contribución que podría hacer la energía nuclear en el cumplimiento de los

objetivos de alcanzar emisiones netas cero al año 2050, las que son comunes a casi todos los escenarios que cumplen con objetivos climáticos rigurosos. Estas son:

- Electrificación generalizada de los usos finales de energía, con la electricidad tomando una participación que superaría progresivamente el 50% del consumo final.
- Crecimiento rápido en la generación de electricidad de bajas emisiones.
- La necesidad de reducir las emisiones en la producción de calor.
- Demanda en rápido crecimiento de hidrógeno de bajas emisiones.
- La necesidad continua de apoyar la innovación, que facilita el desarrollo de tecnologías nucleares avanzadas.

El rol que puede tener la energía nuclear depende de las decisiones de los gobiernos en la definición de políticas públicas y de las empresas sobre el ritmo de construcción de nuevos reactores y la duración de la extensión de la operación de los reactores nucleares existentes.

Las proyecciones del desarrollo de la IEA para la energía nuclear en el escenario NZE se basan en la modelación de un análisis económico del sector energía a largo plazo, que incluye proyecciones de costos para cada combustible, tecnología y región, con el fin de determinar la vía económicamente más eficiente de aquí al 2050. Las proyecciones son coherentes con las reducciones planificadas

9 Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/nuclear-power-capacity-by-country-or-region-in-the-net-zero-scenario-1990-2030-2>, IEA

10 El Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050 (NZE) muestra lo que se necesita para que el sector energético global logre emisiones netas de CO<sub>2</sub> cero para 2050. Junto con las correspondientes reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero fuera del sector energético, esto es coherente con la limitación del aumento de la temperatura global a 1,5 °C (con una probabilidad del 50%). Lograr esto requeriría que todos los gobiernos aumentarán metas más allá de las Contribuciones Determinadas a nivel nacional y los compromisos de emisiones netas cero actuales.



de la capacidad de generación, como es el caso de Alemania, Bélgica y Suiza. El NZE incorpora la innovación tecnológica con la comercialización de algunas tecnologías actualmente en etapas avanzadas de desarrollo.

La energía nuclear, con su capacidad de 413 gigavatios (GW) operando en 32 países, contribuye a evitar 1.5 giga toneladas de emisiones globales de CO<sub>2</sub> y 180 mil millones de metros cúbicos (bcm) de demanda global de gas al año.<sup>11</sup> Si bien se espera que la energía eólica y la energía solar fotovoltaica lideren el impulso para reemplazar los combustibles fósiles, estas necesitan ser complementadas por recursos gestionables. Siendo la segunda fuente más grande de energía de bajas emisiones después de la energía hidroeléctrica, y con su capacidad de gestión y potencial de crecimiento, la energía nuclear puede contribuir a garantizar sistemas eléctricos seguros y diversos de bajas emisiones.<sup>12</sup>

El panorama de políticas está cambiando, abriendo oportunidades para un resurgimiento de la energía nuclear. Más de 70 países, que representan tres cuartos de las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía, se han comprometido a reducir sus emisiones a un escenario netas nulas. Si bien las energías renovables proporcionarán la mayor parte de la electricidad de bajas emisiones, y muchos países no ven la necesidad o no desean un papel para la energía nuclear, Reino Unido, Francia, China, Polonia e India han anunciado estrategias energéticas que incluyen roles sustanciales para la energía nuclear. Estados Unidos está invirtiendo en diseños de reactores avanzados.

Las preocupaciones por la seguridad energética y el reciente aumento de los precios de la energía, especialmente tras la invasión de Rusia a Ucrania, han destacado el valor de una mezcla diversificada de fuentes de energía no fósiles y domésticas. Bélgica y Corea han reducido recientemente sus planes para eliminar gradualmente las plantas nucleares existentes. La Estrategia de Seguridad Energética del Reino Unido incluye planes para ocho nuevos reactores de gran tamaño. El reinicio más rápido de los reactores nucleares japoneses que han recibido aprobaciones de seguridad podría liberar cargamentos de gas natural licuado (GNL) tan necesarios en Europa u otros mercados de Asia.

La energía nuclear desempeña un papel significativo en un camino seguro hacia el neto cero global. La capacidad nuclear se duplicará, pasando de 413 GW a principios de 2022 a 812 GW en 2050 en el NZE. Las adiciones anuales de capacidad nuclear alcanzarán los 27 GW por año en la década de 2030, la cifra más alta de cualquier década anterior. Aun así, la participación global de la energía nuclear en la generación total disminuye ligeramente al 8%. Las economías emergentes y en desarrollo representan más del 90% del crecimiento global, y China está en camino de convertirse en el principal productor de energía nuclear antes de 2030.

Las economías avanzadas en conjunto experimentan un aumento del 10% en la energía nuclear, ya que las clausuras de plantas se compensan con nuevas plantas, principalmente en Estados Unidos, Francia, el Reino Unido y Canadá. Se estima que la inversión anual global en energía nuclear aumenta de 30 mil millones de dólares durante la década de 2010 a más de 100 mil millones de

11 IAEA, Nuclear Power and Secure Energy Transitions From today's challenges to tomorrow's clean energy systems.

12 *Ibidem*.



dólares para 2030 y se mantiene por encima de los 80 mil millones de dólares hasta 2050.<sup>13</sup>

## 5. Tendencias en la industria y competitividad de la nucleoelectricidad

En los mercados eléctricos, debido a los procesos de descarbonización de las matrices de generación eléctrica, la energía nuclear ha surgido desde hace algunos años como una opción de proveer a las redes eléctricas de fuentes de energía eléctrica gestionable neutra en emisiones

Actualmente, la tendencia de la energía nuclear en el mundo ha sido mixta y variada en diferentes regiones. Sin embargo, se observa a algunos países promoviendo acciones para reducir el costo de inversión y operación de este tipo de planta, observando las siguientes:

- Decrecimiento en algunos países: varios países han optado por reducir o eliminar gradualmente su dependencia de la energía nuclear debido a preocupaciones sobre la seguridad, los residuos nucleares y el alto costo de construcción y desmantelamiento de plantas nucleares. En esta situación se encuentran Alemania, que ha establecido un plan de cierre de todas sus centrales nucleares y Bélgica, que también planea discontinuar gradualmente sus plantas de energía nuclear.
- Extensión de vida útil e incremento de capacidad en otros países: algunos han adoptado la decisión de continuar el desarrollo de la energía nuclear como una fuente relevante de generación de energía baja en carbono. Entre estos se incluyen China, que ha estado

construyendo nuevas plantas nucleares para satisfacer su creciente demanda de energía, y Rusia, que ha estado exportando su tecnología nuclear a otras naciones.

- Investigación y desarrollo: A pesar de las tendencias mixtas en la generación de energía nuclear, la investigación y el desarrollo en tecnologías nucleares avanzadas, como reactores de cuarta generación y reactores modulares medianos y pequeños (SMRs), continúan en todo el mundo incentivado principalmente con la reducción de costos mediante la estandarización de su diseño y mayor aprovechamiento del combustible. Estos avances podrían influir en el futuro de la energía nuclear al abordar las preocupaciones de seguridad, residuos y eficiencia.
- Seguridad y regulación: la seguridad nuclear y la regulación siguen siendo temas claves en la discusión sobre la energía nuclear. La ocurrencia de eventos como el accidente de Fukushima en Japón el 2011 han llevado a una mayor vigilancia y regulación en la industria nuclear en muchos países.
- Cambios en la opinión pública: la opinión pública sobre la energía nuclear ha influido en su tendencia global, particularmente en Europa. Los debates sobre los beneficios y los riesgos de la energía nuclear y la percepción del público sobre la seguridad y la gestión de los residuos nucleares influyen en las decisiones que adopten los países en el uso de la energía nuclear.

Hasta ahora la industria de generación nucleoelectrónica no emplea diseños estandarizados, pese a que el más utilizado en el mundo es el reactor AP100. Esto implica que cada nueva planta debe

<sup>13</sup> *Ibidem*.



ser diseñada en forma específica, lo que redundará en altos costos de construcción ya que son plantas hechas a medida. A ello se debe agregar el tamaño de dichas plantas, en torno a 1000 MW, lo que restringe su flexibilidad y posibilidad de integración en sistemas eléctricos de menor tamaño como el chileno. Se proyecta que los costos de edificación de reactores disminuyan para los diseños estandarizados en construcción, como el AP1000 de Westinghouse y Hualong-1.

El principal cambio que se observa en esta industria es el desarrollo de los llamados reactores modulares medianos y pequeños, los que progresivamente están ganando interés debido a su potencial para abordar los desafíos asociados con los reactores nucleares convencionales. Si bien, el concepto de SMR no es nuevo, estos han sido utilizados en aplicaciones militares en submarinos y portaaviones con potencias entre 50 y 190 MWt, los que no cumplen estándares de seguridad para aplicaciones civiles.

Las principales tendencias y desarrollos relacionados con los SMR incluyen.<sup>14</sup>

- Investigación y desarrollo continuo: numerosos países y empresas han estado trabajando en el desarrollo y la investigación de tecnologías de SMR. Se están explorando diferentes diseños y conceptos, como reactores de alta temperatura, reactores de sal fundida y reactores de agua presurizada con el objetivo de crear diseños más seguros, eficientes y versátiles.
- Interés de los gobiernos y financiamiento: varios gobiernos han mostrado interés en apoyar la investigación y el desarrollo de

tecnologías de SMR como parte de sus esfuerzos para abordar el cambio climático y diversificar sus fuentes de energía. Esto ha llevado a inversiones y financiamiento en proyectos de SMR en diferentes partes del mundo.

- Flexibilidad y escalabilidad: una de las ventajas clave de los SMR es su capacidad para ser más flexibles y escalables en comparación con los reactores nucleares tradicionales. Los SMR pueden ser diseñados para satisfacer diferentes necesidades de generación de energía, desde aplicaciones industriales y de calefacción hasta generación de electricidad para comunidades más pequeñas.
- Reducción de costos y plazos: los SMR se benefician de la producción en serie para alcanzar economías de escala y la modularidad, lo que podría ayudar a reducir los costos de construcción y acortar los plazos de implementación en comparación con los reactores nucleares convencionales de gran escala.
- Desafíos técnicos y regulatorios: a pesar de su promesa, los SMR todavía enfrentan desafíos técnicos y regulatorios. Los procesos de aprobación y licenciamiento pueden ser complejos y llevar tiempo, y se requiere un enfoque riguroso en la seguridad y la gestión de residuos nucleares.
- Colaboración internacional: varias naciones están colaborando en la investigación y el desarrollo de tecnologías de SMR a través de asociaciones internacionales. La cooperación internacional puede acelerar la innovación y permitir el intercambio de mejores prácticas y conocimientos.

14 International Atomic Energy Agency, Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, IAEA Nuclear Energy Series No. International Atomic Energy Agency, Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm, 2022.

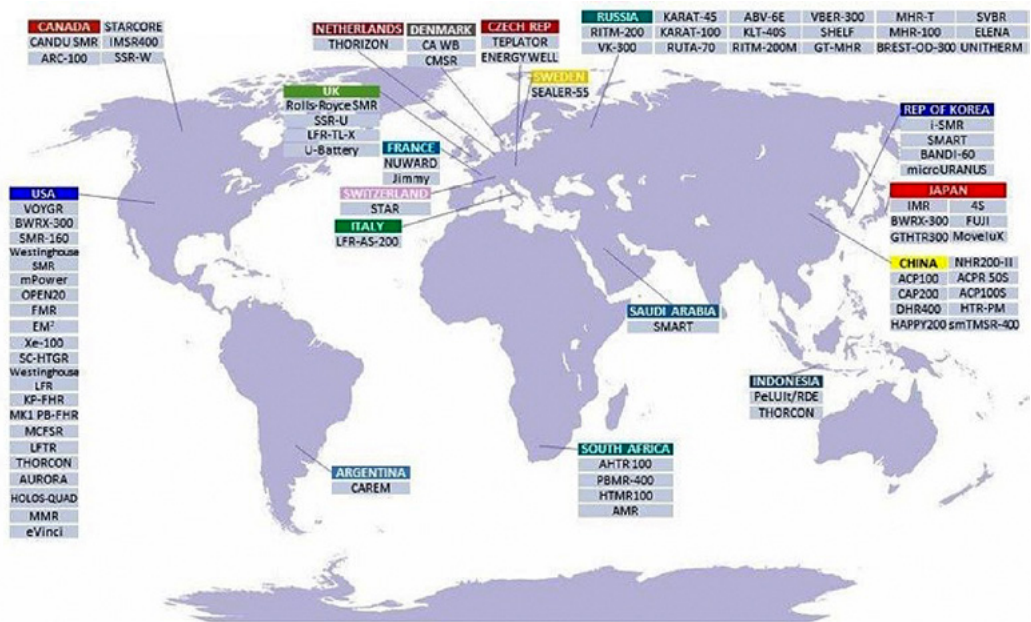


Figura N° 2. Estado de los desarrollos de reactores SMR

**Fuente:** International Energy Agency, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments -A Supplement to: IEA Advanced Reactors Information System (ARIS)- 2022 Edition, IEA, Viena 2022.

El Departamento de Energía de EE.UU. (DOE) ha impulsado el programa Small Modular Reactors (SMR) como el principal paso para alcanzar la estandarización y flexibilidad, reduciendo los tiempos de construcción, ampliando los sitios para instalarlos y lograr más posibilidades de financiamiento. Los tamaños típicos de estas centrales están entre 50 y 250 MW, pudiendo ser construidos en una fábrica como unidad integral y montados en el sitio de la central.

Los avances en la investigación y desarrollo en varios países y sus actividades relacionadas con los reactores modulares pequeños (SMRs) y la tecnología de energía nuclear, se resumen a continuación:

**Argentina:** desarrollando la tecnología CAREM<sup>15</sup> y está cerca de completarla para su operación en 2023 de un reactor de 25 MW.

**Brasil:** cooperación con el OIEA en tecnología de energía nuclear y SMRs.

**Bulgaria:** explorando la posible implementación de un SMR provisto por NuScale Power Inc en el sitio de Kozloduy.

**Canadá:** Canadá está implementando la Hoja de Ruta de Canadá para los reactores modulares pequeños (SMR); el organismo regulador está activo en la revisión de diseños de SMR; las empresas de

15 El CAREM es el primer reactor nuclear de potencia íntegramente diseñado y construido en Argentina. El proyecto implica el desarrollo y puesta en marcha de una central nuclear, en el segmento de reactores modulares de baja y media potencia con una potencia eléctrica de 25 MW.





servicios públicos, incluyendo OPG y Bruce Power, están colaborando en SMRs para su despliegue a corto plazo. OPG ha seleccionado un sitio para la construcción.

**República Checa:** desarrollando tecnología para dos SMRs, incluyendo microrreactores.

**China:** desarrollando varios diseños de SMRs y un organismo regulador activo para otorgar licencias para SMRs.

**Finlandia:** activa en la I+D de SMRs, con un enfoque complementario en calefacción distrital nuclear con SMRs.

**Francia:** desarrollando tecnología para SMR NUWARD, con un organismo regulador activo en otorgar licencias.

**India:** desarrollando varios SMRs y un organismo regulador activo para otorgar licencias para construcción de SMRs.

**Irán:** explorando la implementación de SMRs en cooperación con China y Rusia.

**Japón:** desarrollando SMRs de tipo BWR<sup>16</sup> y HTGR,<sup>17</sup> con un reactor de alta temperatura actualmente en funcionamiento.

**Corea:** laboratorios nacionales y universidades apoyando el desarrollo internacional de tecnología SMR.

**Pakistán:** interesado en la implementación de SMRs, con experiencia en la construcción y operación

de reactores de tamaño mediano; interesado en la producción local y desarrollo de la cadena de suministro de SMRs, en cooperación con China.

**Rumania:** planeando construir una planta de SMR para 2028, en cooperación con NuScale Power Inc.

**Federación Rusa:** desarrollando varios SMRs, incluyendo la planta flotante NPP Akademik Lomonosov, con trabajo regulatorio activo. El organismo regulador está activo en otorgar licencias para SMRs; planeado comenzar la construcción del RITM-200N en 2024 en la región de Yakutia con el objetivo de entrar en operación en 2028.

**Sudáfrica:** participación regulatoria activa en el Foro de Reguladores de SMRs del OIEA, con experiencia en HTGR.

**Suecia:** vattenfall está estudiando la viabilidad de construir SMRs en el sitio de la central nuclear de Ringhals.

**Reino Unido:** desarrollando la tecnología SMR y participando activamente en su regulación.

**Estados Unidos:** desarrollando varios SMRs, incluyendo micro-reactores. El organismo regulador está activo en otorgar la licencia de SMRs. NuScale Inc. recibió la aprobación de diseño en 2020. El proyecto de NuScale en Idaho Falls, Idaho, tiene previsto comenzar a operar en 2029.

En la tabla siguiente se describen brevemente los principales desarrollos de SMR en el mundo. Entre ellos, se destaca el diseño CAREM de Argentina de 25 MW de capacidad, el que se

<sup>16</sup> Reactor de agua en ebullición (boiling water reactor).

<sup>17</sup> Reactor de alta temperatura refrigerado por gas (High temperature gas reactor).





encuentra en construcción, y el modelo ACP 100 de China.

El diseño más avanzado es la tecnología de NuScale Power LLC ([www.nuscalepower.com](http://www.nuscalepower.com)), el que se encuentra en sus etapas finales de certificación en EE.UU. Este diseño consiste en una unidad modular que es capaz de producir 50 MW eléctricos, pudiendo operar en grupos de hasta 12 reactores, para llegar a 600 MW. El costo de construcción

de una planta se estima que actualmente sería menos a 5.000 US\$/kW, lo que disminuiría con la estandarización. Este diseño cumple con los requerimientos de proveer seguridad sísmica y sistemas de detención automática autónomos del exterior en caso de contingencias. Tennessee Valley Authority está desarrollando un proyecto de generación basado en el diseño de NuScale con el objetivo de tener una planta operativa el año 2027.

Design	Output MW(e)	Type	Designers	Country	Status
<b>WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS</b>					
CAREM	30	PWR	CNEA	Argentina	Under construction
ACP100	125	PWR	CNNC	China	Under construction
NUWARD	2 × 170	PWR	EDF, CEA, TA, Naval Group	France	Conceptual design
SMART	107	PWR	KAERI and K.A.CARE	Republic of Korea	Standard design approval received
KLT-40S	2 × 35	PWR in floating NPP	JSC Afikavitov OKEM	Russian Federation	In operation
RITM-200N	2 × 53	PWR	JSC Afikavitov OKEM	Russian Federation	Detail design
UK SMR	443 <sup>a</sup>	PWR	Rolls-Royce and Partners	United Kingdom	Conceptual design
NuScale	6 × 77	PWR	NuScale Power Inc.	United States of America	Received US NRC certification
BWRX-300	270-290	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy and Hitachi GE Nuclear Energy	United States of America and Japan, Canada	Pre-licensing
<b>HIGH TEMPERATURE GAS COOLED SMALL MODULAR REACTORS</b>					
HTR-PM	210	HTGR	INET, Tsinghua University	China	In operation
GTHTR300	100-300	HTGR	IAEA	Japan	Pre-licensing
Xe-100	82.5	HTGR	X-Energy LLC	United States of America	Basic design
<b>FAST NEUTRON SPECTRUM SMALL MODULAR REACTORS</b>					
EM <sup>2</sup>	265	GMFR	General Atomics	United States of America	Conceptual design
<b>MOLTEN SALT SMALL MODULAR REACTORS</b>					
Integral MSR	195	MSR	Terrastral Energy Inc.	Canada	Conceptual design
KP-FHR	140	Pebble bed salt cooled Reactor	KAIROS Power, LLC.	United States of America	Conceptual design
<b>MICROREACTORS</b>					
U-Battery	4	HTGR	Urenco	United Kingdom	Conceptual design
MMR	5-10	HTGR	Ultra Safe Nuclear Corporation	United States of America, Canada	Conceptual design
Aurora	1.5	FR	OKLO, Inc.	United States of America	Conceptual design

Tabla N° 1. SMR de desarrollo avanzado.

**Fuente:** International Atomic Energy Agency, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments - A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) - Edition, IAEA, Vienna 2022.

Adicionalmente a los SMR, también se han desarrollado los microrreactores nucleares, los que están

orientados a proporcionar generación distribuida de electricidad y calor. Recientemente, el Depar-

tamento de Energía (DOE) de Estados Unidos de América ha informado que tres desarrolladores de microrreactores nucleares diseñarán los primeros experimentos en el nuevo banco de pruebas de Demostración de Experimentos de Microrreactores (DOE) en el Laboratorio Nacional de Idaho (INL), que reutiliza la estructura de contención del Reactor Experimental EBR-II.

Westinghouse, Radiant Nuclear y Ultra Safe Nuclear Corp. (USNC) están avanzando en el diseño de sus microrreactores a través de un proceso de diseño de ingeniería y experimentación de la etapa inicial (FEEED) liderado por el Centro Nacional de Innovación de Reactores (NRIC), un programa lanzado por el DOE en 2020 para acelerar la demostración e implementación de la energía nuclear avanzada.

Westinghouse está en proceso de efectuar las pruebas de su reactor eVinci (figura N° 3), que es un concepto de microrreactor portátil de hasta 5 MWe que se espera será lanzado al mercado en 2027 y que sería adecuado para aplicaciones de descentralización o resiliencia de la red eléctrica.

El microrreactor eVinci tiene muy pocas piezas móviles, funcionando esencialmente como una batería, proporcionando una gama amplia de potencia que va desde algunos kW hasta 5 MW de electricidad, pudiendo operar durante más de ocho años sin necesidad de reaprovisionar combustible. Westinghouse señala que puede producir calor a alta temperatura adecuado para aplicaciones industriales, incluida la producción de combustibles alternativos como el hidrógeno. Este microrreactor se construye y ensambla completamente en fábrica antes de ser enviado a su ubicación.

Respecto de los costos y la competitividad de las tecnologías nucleares, en el informe "LAZARD 'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS - VERSION 15.0" de octubre de 2021 se compara los costos medios de desarrollo de diferentes tecnologías de generación eléctrica. Para la central nuclear entrega un rango costo medio entre 131 y 204 US\$/MWh (figura N° 4), lo que supera ampliamente a las centrales de ciclo combinado que utilizan gas natural. Sin perjuicio de ello, debe tenerse en cuenta que los compromisos que han adquirido los países para mitigar los efectos del cambio climático implicarán dejar de utilizar tecnologías basadas en combustibles fósiles. A ello debe agregarse la tendencia a establecer impuestos a las emisiones de centrales generadoras, lo que hace más costosa su operación y, consecuentemente, hace más competitiva a la generación nuclear.

Los costos de inversión de estas centrales, según el mismo informe, están en el rango entre 7.800 y 12.800 US\$/KW instalado, lo que incide fuertemente en su competitividad frente a fuente de generación renovable como la energía solar y eólica.



Figura N° 3. Reactor Westinghouse e-Vinci.

**Fuente:** [https://www.powermag.com/doe-picks-nuclear-designs-for-first-microreactor-experiments-at-inls-new-test-bed/?utm\\_source=NP&utm\\_medium=email&utm\\_id=10252023&oly\\_enc\\_id=8786G4250156F5Ct](https://www.powermag.com/doe-picks-nuclear-designs-for-first-microreactor-experiments-at-inls-new-test-bed/?utm_source=NP&utm_medium=email&utm_id=10252023&oly_enc_id=8786G4250156F5Ct)

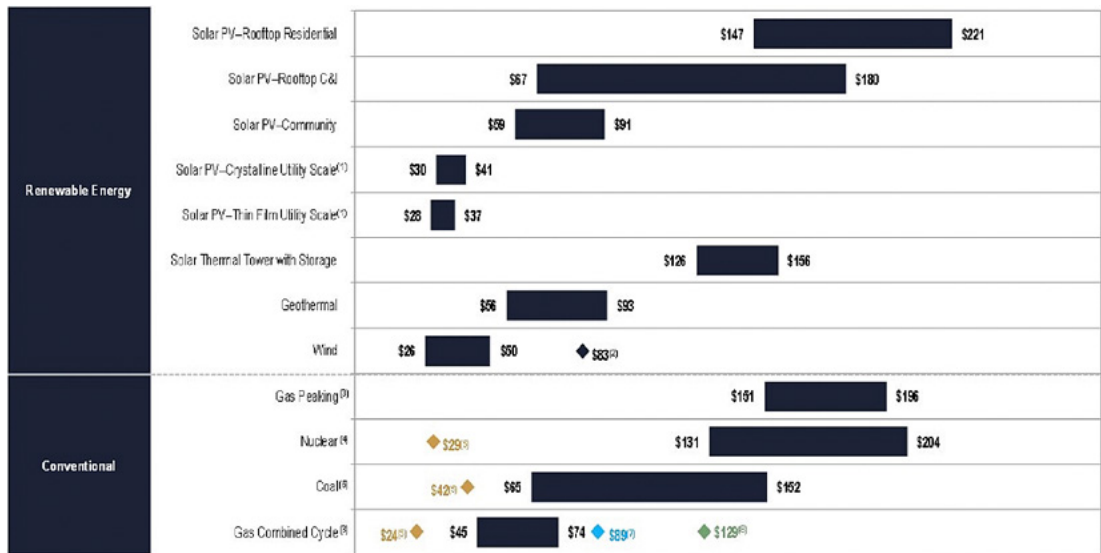


Figura Nº 3: Costos medios de desarrollo de tecnologías de generación de energía

Fuente: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-2021/>

## 6. Chile y la energía nuclear

### 6.1. Marco regulatorio nacional

La Ley 18.302 de 1984, regula todas las actividades relacionadas con los usos pacíficos de la energía nuclear, las sustancias nucleares y materiales radiactivos que se utilicen, como asimismo en su transporte, con el objeto de proveer la protección de la salud, la seguridad y el resguardo de las personas, los bienes y el medioambiente y la justa indemnización o compensación por los daños que dichas actividades provocaren; de prevenir la apropiación indebida y el uso ilícito de la energía, sustancias e instalaciones, nucleares; y de asegurar el cumplimiento de los acuerdos o convenios internacionales sobre la materia en que Chile sea parte.

Esta Ley establece que *“la regulación, la supervisión, el control y la fiscalización de las actividades indica-*

*das en el artículo anterior* 119 *corresponderán a la Comisión Chilena de Energía Nuclear y al Ministerio de Energía en su caso”.*

A su vez, la ley Nº 16.319 creó la Comisión Chilena de Energía Nuclear en el año 1965. En términos de la normativa vigente que rige el actuar de la CCHEN<sup>18</sup> y de sus regulaciones, esta se compone de los siguientes reglamentos:

- Decreto Supremo Nº 323/ 1974, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, “Licencias de la Comisión Chilena de Energía Nuclear”.
- Decreto Supremo Nº 115/1976, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, “Normas básicas de protección radiológica”.
- Decreto Supremo Nº 450/ 1975, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, “Términos Nucleares”.
- Decreto Supremo Nº 133/1984, del Ministerio

18 Comisión chilena de Energía Nuclear.



de Salud, "Autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas u opere tales equipos y otras actividades afines".

- Decreto Supremo N° 3/1985, del Ministerio de Salud, "Protección radiológica de instalaciones radiactivas".
- Decreto Supremo N° 87/1985, del Ministerio de Minería, "Protección física de las instalaciones y de los materiales nucleares".
- Decreto Supremo N° 12/1985, del Ministerio de Minería, "Transporte seguro de materiales radiactivos".

## 6.2. Reactores en Chile

Chile solo dispone de dos reactores nucleares de investigación. El primero de ellos, localizado en la comuna de La Reina, entró en servicio en el año 1970, donde se realizan actividades de investigación y producción de isótopos radioactivos. Posteriormente, se construyó un segundo reactor, localizado en el sector de Lo Aguirre, destinado a un Centro de Estudios Nucleares del Ejército. El reactor de Lo Aguirre entró en servicio el año 1977, siendo su función las operaciones de investigación. Actualmente (2023) el reactor del Centro se encuentra inactivo desde el año 2010. Ambos reactores son de baja potencia, con valor inferior a 5 MWt.

En marzo de 2007, la presidenta Bachelet creó un Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad, con el fin de analizar la viabilidad de desarrollar la energía nuclear en el país. En septiembre de ese mismo año, el grupo liderado por Jorge Zanelli emitió su informe. El grupo de trabajo identificó las brechas que tenía el país en esta materia, los riesgos que implicaba el desarrollo de una central nuclear y el

costo económico. Así, el grupo de trabajo concluyó que no existían las condiciones institucionales ni legales, por lo que recomendó continuar con estudios tendientes a mejorar el análisis.

Cabe considerar que en los posteriores gobiernos no se han desarrollado nuevos estudios para determinar la viabilidad de desarrollar centrales nucleares.

## 6.3. Chile en el contexto internacional

La Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA)<sup>19</sup> es un organismo internacional establecido en 1957 como una entidad autónoma dentro del sistema de Naciones Unidas. Su sede se encuentra en Viena, Austria. La AIEA tiene como objetivo principal promover el uso pacífico y seguro de la energía nuclear a nivel mundial y prevenir la proliferación de armas nucleares. Chile se incorporó a la Agencia Internacional de Energía Atómica en el año 1960.

En esa misma línea de acción, el país ha suscrito acuerdos de cooperación en materia de energía nuclear, entre los que destacan: i) el acuerdo suscrito con Francia en febrero de 2011, respecto de reactores de investigación y de producción de radioisótopos para la industria, agricultura y medicina, el desarrollo de negocios en el área nuclear y gestión de residuos radiactivos, y la formación de recursos humanos y educación; y, ii) el acuerdo suscrito con Estados Unidos en marzo de 2011, *el cual incluye aspectos relativos a:* Operación y utilización de reactores de investigación nuclear, suministro de uranio para producir el combustible para los reactores, gestión de los residuos radiactivos y del combustible nuclear gastado, formación de recursos humanos e infraestructura, aplicación de radioisótopos para la

19 Disponible en: <https://www.iaea.org/>



industria, la salud, la agricultura y el agua, seguridad nuclear; salvaguardias y no proliferación; control de exportaciones y seguridad fronteriza.

Además, Chile es parte del Tratado para la Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares, el que suscribió en septiembre de 1996 y lo ratificó el 12 de julio de 2000, siendo un promotor del tratado, demostrando su compromiso apoyando las iniciativas de la Comisión Preparatoria para facilitar su entrada en vigor.

Así, Chile es parte de la red de vigilancia de ensayos nucleares, para lo cual operan 7 estaciones de vigilancia del sistema, las que se ubican en Isla de Pascua, Limón Verde, Juan Fernández y Punta Arenas, y las que incluyen las distintas tecnologías (sísmicas, hidroacústicas, infrasónicas y radionucleicas). A pesar de que el tratado aún no ha entrado en vigor, estas estaciones ya están funcionando para detectar la eventual realización de un ensayo nuclear.

## 7. Recomendación para Chile

Las tecnologías de generación núcleo eléctrica comercialmente disponibles en la actualidad no son viables para Chile, ello debido a: el alto costo de la energía que entregan; debido a que su tamaño hace muy difícil su integración al sistema eléctrico; su falta de flexibilidad, manejo de residuos y las limitadas localizaciones debido a restricciones sísmicas para su construcción. A ello se debe agregar la percepción negativa que aún tiene la sociedad y las comunidades.

Dado los desarrollos de las nuevas tecnologías en reactores nucleares SMR, y que la nucleoelectricidad tendrá una participación relevante

en la matriz energética mundial en un escenario de baja intensidad de carbono, se recomienda mantener vigente el monitoreo del desarrollo de esta tecnología de generación enfocada exclusivamente en los SMR. Se estima que esta opción podría ser evaluada para tomar una decisión de inversión más allá del año 2040. En el intertanto, el país podría analizar la viabilidad y conveniencia de desarrollar sus competencias e infraestructura para cumplir con los requerimientos de la Organización Internacional de Energía Atómica.

Por otra parte, si bien en Chile existen algunos prospectos de minería de uranio en el país, estos están ubicados cerca de la cordillera de la costa de la zona centro-norte del país, con un bajo potencial que se ha estimado en 1.500 toneladas. Considerando los efectos medioambientales que tiene la minería de uranio, se estima muy poco probable la explotación de estos recursos. Por tanto, Chile dependería exclusivamente de fuentes externas para su suministro de combustible.

Desde un punto de vista económico, considerando los recursos de energías renovables con los que cuenta el país, que superan con creces la demanda de energía eléctrica actual y futura,<sup>20</sup> y que estos presentan costos sustancialmente inferiores a la energía nuclear, esta opción debe ser descartada. Adicionalmente, desde una perspectiva ambiental y de percepción de la población, las energías renovables tienen un bajo impacto y una mayor aceptación.

## 8. Situación en la región

En la región sudamericana, los países que disponen de tecnología nuclear han estado enfocados en

20 Ministerio de Energía, Transición Energética de Chile Política Energética Nacional, Actualización 2022, febrero 2022



reactores de investigación, con la sola excepción de Argentina, país que ha desarrollado un programa de centrales nucleares.

### 8.1. Programas de investigación nuclear en Sudamérica

Brasil ha tenido un programa nuclear activo y ha construido plantas nucleares con fines no eléctricos, como la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas e industriales. La planta nuclear más conocida en Brasil es el Centro de Ciencias y Tecnología Nucleares (CCTN), que se encuentra en la ciudad de São Paulo. Asimismo, Brasil ha estado considerando la posibilidad de desarrollar centrales nucleares para la generación de electricidad en el futuro, pero hasta la fecha no ha tomado acciones en ese sentido.

Por su parte Perú solo ha estado involucrado en actividades nucleares relacionadas con la investigación y aplicaciones médicas, industriales y científicas. Además, Perú opera un reactor nuclear de investigación llamado "RP-10", ubicado en el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) en Lima. Este reactor se utiliza principalmente para la investigación y la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas e industriales.

También Bolivia ha tenido actividades relacionadas con la investigación y la medicina nuclear. El Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN) opera un reactor nuclear de investigación llamado "IR-100" en la ciudad de El Alto, que se utiliza principalmente para la investigación y la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas y científicas.

### 8.2. Desarrollo nuclear en Argentina

Argentina creó la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en el año 1950, enfocando su actividad en la investigación y desarrollo nuclear, incluida la construcción de varios reactores de investigación. Actualmente, la CNEA opera cinco reactores de investigación y otros en construcción.

En el año 1964, el foco de atención se centró en la energía nuclear, y tras un estudio de viabilidad para una unidad de 300 a 500 MW en el área de Buenos Aires, inició el proceso para obtener ofertas para su construcción. Dado que la política del país en ese momento se basaba firmemente en el uso de reactores de agua pesada alimentados con uranio natural, las ofertas de Canadá y Alemania fueron las más atractivas, y se aceptó la oferta de Kraftwerk Union (KWU). Esa planta se denominó Atucha con una potencia instalada de 362 MW (brutos).

Posteriormente, CNEA desarrolló dos nuevas centrales nucleares, Atucha 2 y Embalse, con lo que alcanzó una capacidad instalada de generación de 1641 MW en centrales nucleares. En la tabla siguiente se resumen las principales características de dichas centrales nucleares.

Central	Modelo	Pot. instalada (MW)	Inicio obra	Entrada servicio
Atucha 1	PHWR <sup>21</sup> KWU	340	Jun-68	Mar-74
Embalse	CANDU6 <sup>22</sup>	608	Abr-74	Abr-83
Atucha 2	PHWR KWU	693	Jul-81	Jun-14

Tabla Nº 2. Centrales nucleares en operación en Argentina.

Fuente: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/argentina.aspx>

21 Pressurized Heavy Water Reactor.

22 Reactor Canadian Deuterium Uranium, es un reactor presurizado de agua pesada desarrollado en Canadá.





En julio de 2014, los presidentes de Argentina y China firmaron un acuerdo de alto nivel para la construcción de Atucha 3, utilizando una unidad de reactores de agua pesada a presión en la que CNNC (Corporación Nuclear Nacional de China) proporcionaría la mayor parte del equipo y servicios técnicos y financiamiento a largo plazo. La potencia instalada que tendría Atucha 3 sería de una capacidad instalada de aproximadamente 1.200 MW basada en el diseño ACP1000.<sup>23</sup>

Además, Argentina está analizando la construcción de una quinta central nuclear que podría utilizar el diseño canadiense CANDU6 o el diseño chino ACP-1000, con una potencia instalada estimada entre 750 y 1.200 MW respectivamente.

### 8.2.2. Desarrollo de reactores modulares

El gobierno argentino elaboró un plan estratégico en el año 2006 para la construcción de un prototipo de reactor modular de pequeña escala, con una capacidad de 29 MW, denominado CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares). A partir del año 2014, la construcción está en proceso en el sitio de Atucha. Aproximadamente el 70% de los componentes se fabricarán localmente. El costo total se estimó en 446 millones de dólares. En diciembre de 2013, se adjudicó a Industrias Metalúrgicas Pescarmona SA (IMPESA) la construcción del recipiente a presión del reactor de 200 toneladas, siendo el primer componente de este tamaño fabricado en el país. En septiembre de 2016, se adjudicó

al consorcio Tecna-Siemens la construcción de los otros componentes de la planta.

El reactor nuclear CAREM25 es un PWR<sup>24</sup> simplificado modular de 100 MWt con generadores de vapor integrales, diseñado para su uso en la generación de electricidad, como reactor de investigación o para procesos de desalinización de agua.

En noviembre de 2019, los trabajos de construcción se detuvieron debido a pagos atrasados por parte del gobierno, cambios en el diseño y entrega tardía de documentación técnica por parte del contratista Techint Engineering & Construction. En octubre de 2022, la CNEA anunció que se espera que las obras de construcción civil se completen para 2024, con una fecha de puesta en marcha para finales de 2027.

Adicionalmente, Argentina ha construido varios reactores de investigación para clientes internacionales en Egipto (ETRR-2), Argelia (NUR), Perú (RP-0 y RP-10) y Australia (OPAL), lo que muestra el desarrollo de su industria nuclear.

### 8.2.3. Minería de Uranio

Los recursos de uranio argentinos al año 2022 se estiman en 11.000<sup>25</sup> toneladas de uranio, aunque la CNEA estima que existen alrededor de 80.000 toneladas de uranio en varios entornos geológicos diferentes. La exploración de uranio y una pequeña explotación minera se llevaron a cabo a partir de mediados de la década de 1950, pero la última mina cerró en 1997 por razones económicas. La producción nacional acumulativa hasta entonces

23 ACP-1000 es un reactor de diseño chino de agua a presión HPR-1000, perteneciente a la llamada Generación III y conocido como Hualong-1.

24 Reactor de agua a presión.

25 Disponible en: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true).





de depósitos de arenisca en minas a cielo abierto y lixiviación en pilas en siete minas fue de 2.582 toneladas de uranio.

Del mismo modo la CNEA está desarrollando estudios de factibilidad para explotación minera en el depósito Cerro Solo en la provincia de Chubut. Los recursos estimados en areniscas son de 4.600 toneladas de uranio. Sin embargo, los planes se complican debido a una prohibición provincial de la minería a cielo abierto.

En 2007, la CNEA llegó a un acuerdo con el gobierno provincial de Salta, para reabrir la mina de uranio Don Otto, al sur de Salta, que operó intermitentemente entre 1963 y 1981. También CNEA informó de un proyecto minero en Quebrada de Alipan, provincia de La Rioja en 2014.

## 9. Implicancias geopolíticas y en la defensa

### 9.1. La invasión de Rusia en Ucrania podría tener consecuencias negativas

La guerra entre Rusia y Ucrania ha relevado la preocupación de los países por la seguridad energética, lo que se evidenció en la dependencia del gas ruso en la Unión Europea, esto podría fortalecer el argumento a favor de la energía nuclear en algunos países a medida que buscan reducir su dependencia de los combustibles fósiles que alcanzan altos precios y con inseguridad de suministro, y simultáneamente acelerar el cumplimiento de sus metas de reducción de emisiones de carbono.

Sin embargo, también podría tener impactos negativos. El conflicto plantea cuestionamientos sobre el futuro de Rusia como productor y exportador de suministros de combustible nuclear. A través de la empresa TVEL, subsidiaria de Rosatom, Rusia suministra el combustible nuclear a 73 reactores de diseño ruso (VVER) instalados en Rusia y en otros países, incluyendo Ucrania, Bielorrusia, Armenia, Bulgaria, Finlandia, la República Checa, Hungría, Eslovaquia, China, India e Irán, lo que representaba alrededor del 16% del mercado mundial en 2020. CEZ, la empresa eléctrica estatal checa, anunció recientemente que obtendrá su suministro de combustible para su central nuclear de Temelín de dos proveedores occidentales a partir de 2024.

Rusia desempeña un rol significativo en la producción de combustible de uranio, representando el 38% del procesamiento de uranio en todo el mundo y más del 45% de la capacidad de enriquecimiento de combustible en el año 2020. Gran parte del uranio procesado y enriquecido por Rusia proviene de Kazajistán, que fue responsable del 41% de la producción mundial de uranio en 2020.

Euratom,<sup>26</sup> que supervisa el comercio de uranio en Europa, estima que las empresas rusas proporcionaron aproximadamente el 24% de los servicios de conversión de uranio y el 25% de los servicios de enriquecimiento a las empresas de la Unión Europea en el año 2020.

La empresa francesa Orano, suministra la mayor parte de los servicios de enriquecimiento y de

26 El objetivo de la Euratom fue crear un mercado para el combustible y la energía nuclear, para su distribución en el interior del conjunto de los Estados miembros y para vender el sobrante a los Estados no miembros. Establece normas en materia de protección radiológica y garantizar el uso pacífico de los materiales nucleares y el abastecimiento de combustibles nucleares.



conversión a las empresas de la Unión Europea, siendo también Canadá y Estados Unidos proveedores significativos de servicios de conversión para ellas.

## 9.2. La producción y recursos de uranio están concentradas geográficamente

Alrededor de dos tercios de la producción mundial de uranio proviene de minas localizadas en Kazajstán, Canadá y Australia. En el año 2022, Kazajstán produjo la mayor parte del uranio, alcanzando un 43% del suministro mundial, seguido por Canadá con un 15% y Namibia con un 11%.<sup>27</sup>

Pese a estar concentrada la producción de uranio, no puede ser usado en su estado puro, y debe ser enriquecido con tecnología que solo tienen algunos países, entre los que destacan Rusia y Francia, países que cubren parte importante del servicio.

País	2019 Ton	2020 Ton	2021 Ton	2022 Ton
Kazajstán	22,808	19,477	21,819	21,227
Canadá	6938	3885	4693	7351
Namibia	5476	5413	5753	5613
Australia	6613	6203	4192	4553
Uzbekistan (est.)	3500	3500	3520	3300
Rusia	2911	2846	2635	2508
Niger	2983	2991	2248	2020
China (est.)	1885	1885	1600	1700
India (est.)	308	400	600	600
Sudáfrica (est.)	346	250	192	200
Ucrania	800	744	455	100
EE.UU.	58	6	8	75

País	2019 Ton	2020 Ton	2021 Ton	2022 Ton
Pakistan (est.)	45	45	45	45
Brasil	0	15	29	43
Iran (est.)	71	71	21	20
Total mundial	54,742	47,731	47,808	49,355

Tabla 3. Recursos de uranio en el mundo.

Fuente: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>

Más de la mitad de la producción de uranio proviene de empresas mineras estatales, algunas de ellas priorizan el suministro seguro por encima de consideraciones de mercado. En el año 2022, las 10 principales empresas productoras aportaron más del 90%<sup>28</sup> de la producción mundial de uranio.

A su vez, dos tercios de los recursos de uranio se concentran en cinco países, Australia, Kazajstán, Canadá, Rusia y Namibia. De ellos, casi 30% están en países con inestabilidad o situaciones de conflictos, lo que no permite garantizar un suministro continuo.

En el cuadro siguiente se detalla la producción de uranio en el mundo.

País	Toneladas de Uranio	Porcentaje global del recurso
Australia	1,684,100	28%
Kazakhstan	815,200	13%
Canada	588,500	10%
Rusia	480,900	8%
Namibia	470,100	8%
South Africa	320,900	5%
Niger	311,100	5%

<sup>27</sup> Disponible en: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>

<sup>28</sup> *Ibidem*.



País	Toneladas de Uranio	Porcentaje global del recurso
Brazil	276,800	5%
China	223,900	4%
Mongolia	144,600	2%
Uzbekistan	131,300	2%
Ukraine	107,200	2%
Botswana	87,200	1%
USA	59,400	1%
Tanzania	58,200	1%
Jordan	52,500	1%
Other	266,600	5%
World total	6,078,500	

Tabla N° 4. Recursos de uranio en el mundo.

**Fuente:** <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>

En este contexto, los países que dependen de la importación de uranio para sus programas nucleares están sujetos a riesgos de suministro geopolíticos. A ello hay que agregar el riesgo adicional debido a la concentración que existe en la capacidad para enriquecer uranio para producir combustible nuclear.

### 9.3. Riesgos de seguridad y medioambiente

El conflicto Rusia-Ucrania ha evidenciado que las centrales nucleares son objetivos potenciales en conflictos armados. Los ataques a centrales nucleares pueden tener consecuencias catastróficas debido a la liberación de material radiactivo y poniendo en riesgo a poblaciones cercanas y generando contaminación radioactiva de largo plazo.

Además, las instalaciones nucleares son vulnerables a ataques cibernéticos, pudiendo tener graves

consecuencias para la seguridad y la operación de las centrales nucleares.

El incidente cibernético más notable fue el ataque con el malware Stuxnet, que se descubrió en 2010 y se dirigía a sistemas de control industrial utilizados en instalaciones nucleares en Irán. Aunque no causó un accidente nuclear, demostró la vulnerabilidad de las instalaciones nucleares a los ataques cibernéticos.

Aunque la seguridad nuclear ha mejorado sustancialmente, los accidentes pueden ocurrir, como fue el caso de Fukushima y Chernobyl. Este evento demostró que un accidente nuclear grave puede tener consecuencias tanto en términos de salud pública como en la percepción de la seguridad nuclear.

Por otra parte, la existencia de depósitos de residuos nucleares, genera riesgos medioambientales, los que son particularmente cuando dichos depósitos son localizados en zonas fronterizas o en áreas geológicamente permeables que contaminen las aguas.

Finalmente, el transporte de material nuclear, incluidos el combustible nuclear y sus residuos, son vulnerables a robos y sabotajes, lo que hace necesario garantizar la seguridad durante el transporte de dichos materiales.

### 9.4. Proliferación nuclear

La proliferación nuclear es un riesgo geopolítico importante, lo que ha llevado a suscribir acuerdos internacionales, como el Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP), y las salvaguardias de la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) que se implementan para prevenir la proliferación para



tratar de frenar la expansión de armas nucleares y promover el desarme de ellas. Si bien Estados Unidos, Rusia, Reino Unido, Francia, China e India han desarrollado programas de armas nucleares desde hace más de 50 años, Pakistán y Corea del Norte han desarrollado armas nucleares, incluyendo misiles de largo alcance.

Adicionalmente, la expansión de programas nucleares civiles para núcleo-electricidad puede proporcionar cobertura para actividades relacionadas con el desarrollo de armas nucleares, lo que requiere ser supervisado.

Finalmente, el acceso de algunos países a tecnología nuclear sensible, como el enriquecimiento de uranio, puede aumentar las tensiones internacionales y plantear preocupaciones sobre la proliferación de armas nucleares.

## 9.5. Terrorismo nuclear

El terrorismo nuclear es una preocupación permanente, ante la posibilidad de que grupos terroristas obtengan material nuclear o ataquen instalaciones nucleares generando una amenaza para la seguridad global. Algunos de los principales riesgos del terrorismo nuclear incluyen:

- Obtención de material nuclear: el mayor riesgo es que un grupo terrorista obtenga material nuclear, como uranio enriquecido o plutonio. Este material podría utilizarse para fabricar un arma nuclear improvisada.
- Construcción de armas nucleares improvisadas: si un grupo terrorista adquiere material nuclear, podría intentar construir una bomba nuclear improvisada. Aunque esto es extremadamente difícil, no se puede descartar por completo.
- Ataques contra instalaciones nucleares: Las

instalaciones nucleares, como centrales nucleares y plantas de enriquecimiento, son objetivos potenciales para grupos terroristas. Un ataque exitoso podría causar un desastre nuclear.

- Sabotaje cibernético: los ataques cibernéticos a instalaciones nucleares pueden desencadenar accidentes o interrupciones en la generación de energía. La seguridad cibernética es una preocupación clave.
- Radiación Sucia: un grupo terrorista podría usar material nuclear, como cesio-137 o el estroncio-90 para crear una "bomba sucia". Una bomba nuclear sucia, también conocida como "bomba radiológica" o "bomba de dispersión radiológica", es un dispositivo explosivo que combina explosivos convencionales con material radiactivo. A diferencia de una bomba nuclear tradicional, una bomba nuclear sucia no utiliza una reacción nuclear en cadena para liberar una gran cantidad de energía. En cambio, su objetivo principal es dispersar material radiactivo en su entorno.
- Infiltración de personal: la posibilidad de que individuos con acceso a instalaciones nucleares sean reclutados por grupos terroristas es una preocupación de seguridad.

## 9.6. Geopolítica nuclear

La energía nuclear tiene una serie de efectos geopolíticos significativos que pueden influir en las relaciones internacionales y la política global. Las disputas sobre el acceso a tecnología nuclear, acuerdos bilaterales y multilaterales, y la cooperación nuclear pueden tener ramificaciones geopolíticas.

Los países con capacidad nuclear, es decir, aquellos



que poseen armas nucleares o tecnología nuclear avanzada, a menudo tienen un mayor poder y prestigio internacional. La posesión de armas nucleares puede conferir a un país un estatus de “potencia nuclear” y le otorga influencia en asuntos globales.

La proliferación nuclear y la posibilidad de que más países obtengan armas nucleares pueden alterar el equilibrio de poder en regiones específicas o a nivel mundial. Esto puede llevar a tensiones y rivalidades geopolíticas.

Las cuestiones relacionadas con la energía nuclear, la no proliferación y el desarme a menudo son temas clave en la diplomacia internacional. La preocupación por la proliferación nuclear ha llevado a esfuerzos internacionales para prevenir que más países adquieran armas nucleares. Las tensiones en torno a la energía nuclear, la proliferación y las ambiciones nucleares de diferentes países pueden dar lugar a conflictos regionales. El ejemplo de Corea del Norte es un caso destacado en este sentido.

La energía nuclear, tanto en forma de armas nucleares como de energía civil, puede desempeñar un papel importante en la seguridad nacional. Los países pueden utilizar la energía nuclear para diversificar sus fuentes de energía y reducir su dependencia de los combustibles fósiles o incluso ser la base de su desarrollo energético frente a la falta de otros recursos energéticos, como ha sido el caso de Francia.

La seguridad y defensa son elementos fundamentales en el ámbito de la energía nuclear, y su alcance abarca la protección de diversos aspectos. Esto incluye, en primer lugar, la seguridad humana, que se refiere a la salvaguardia de la salud y el bienestar

de las personas que trabajan en instalaciones nucleares, así como de las comunidades cercanas a estas instalaciones. Además, la seguridad y defensa deben abordar la protección de la infraestructura crítica asociada a la energía nuclear. Esto implica garantizar que las instalaciones nucleares estén protegidas contra amenazas externas, como desastres naturales o actos de terrorismo, para evitar daños a la infraestructura y prevenir la liberación de materiales radiactivos.

## 10. Conclusiones

Diversos países en el mundo han adoptado la decisión de avanzar en nuevos desarrollos de centrales nucleares para la producción de energía eléctrica con el fin de disponer de una fuente energética gestionable y sin emisiones, como parte de sus estrategias de mitigación del cambio climático.

Los desarrollos han estado orientados a reducir los costos de construcción de las centrales mediante la estandarización de los componentes, de forma de lograr economías de escala, en aumentar la eficiencia en el uso del combustible nuclear e incrementar la seguridad de los reactores. Para estos fines, los esfuerzos se han centrado en el desarrollo de los reactores modulares pequeños (SMR) y microrreactores multipropósito.

En Sudamérica, Argentina es el país más avanzado en el desarrollo de la núcleo-electricidad y con planes de expandir su capacidad en centrales nucleares, destacando el desarrollo del reactor CAREM de 29 MW, lo que les ha permitido generar capacidades para la construcción local de centrales nucleares y tener planes para expandir la potencia instalada a 100 MW o superior, e incluso exportar su tecnología de centrales nucleares.



La existencia de grupos de interés que ven con preocupación la utilización de energía nuclear por razones de seguridad y medioambientales ha limitado e incluso detenido su uso en varios países, como es el caso de Alemania.

En el caso de Chile, no se ve la energía nuclear como una opción viable, dado los riesgos percibidos por grupos de interés y la disponibilidad de otros recursos energéticos renovables, tales como energía solar, eólica e hidroeléctrica. Los recursos de energía renovable existentes en el país se estiman en MW, lo que supera con creces la demanda de energía eléctrica en el escenario de emisiones netas nulas de carbono al año 2050. Adicionalmente, se estima que en el caso que el país quisiera calificar ante la agencia Internacional de Energía Atómica para construir una central nuclear, tomaría entre 10 y 15 años cumplir los requisitos para ello.

La energía nuclear tiene impactos relevantes en la defensa y la geopolítica, los que deben ser tenidos en cuenta por el país, dado el potencial desarrollo regional e internacional. El conflicto Rusia-Ucrania ha evidenciado los riesgos de la energía nuclear en dichas situaciones y la concentración en pocos países en la producción de uranio y de combustible nuclear.

## Bibliografía

Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), World Energy Outlook, octubre 2023.

Comisión Chilena de Energía Nuclear, Energía Nuclear de Potencia, Revisión de temáticas relevantes para una discusión, febrero 2020.

International Atomic Energy Agency, Nuclear Energy for a Net Zero World. [en línea], disponible en: <https://www.iaea.org/>.

International Atomic Energy Agency, Nuclear Technology Review - Report by the Director General. 2021. [en línea], disponible: <https://www.iaea.org/>.

International Atomic Energy Agency, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments - A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) - 2022 Edition, IAEA, Vienna 2022. [en línea], disponible en: <https://www.iaea.org/>.

International Atomic Energy Agency, Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, IAEA Nuclear Energy Series No. International Atomic Energy Agency, Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm, 2022. [en línea], disponible en: <https://www.iaea.org/>.

Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis-Version 15.0, 2021.

Ministerio de Energía, Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables 2021 Chile Continental, diciembre 2021.

NR-T-1.18, IAEA, Vienna. 2021. [en línea], disponible en: <https://www.iaea.org/>.