

Carlos Tornel
Luca Ferrari
Omar Masera

Retos y problemas de la energía nuclear como una alternativa para México



Retos y problemas de la energía nuclear como una alternativa para México



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Carlos Tornel
Luca Ferrari
Omar Masera

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt)
Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace-ECC)



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Programa
Nacional
Estratégico



**ENERGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO**



Corrección de estilo

Andrea González Márquez
José Luis Ortega Torres

Diseño editorial

Arlen Hernández • tallerhojarasca.com
contacto@tallerhojarasca.com



Citar como: Tornel, C., Ferrari, L. y Masera, O. (2023). *Retos y problemas de la energía nuclear como una alternativa para México*. México: Pronace ECC-Conahcyt.

“Este cuaderno temático es producto de un proyecto apoyado por el Conahcyt en el año 2024. Los contenidos y el diseño editorial es responsabilidad de las y los colaboradores. El Conahcyt, con el fin de ampliar el acceso a los resultados y productos de los proyectos apoyados, difunde este documento sin que ello represente una postura institucional.”

ISBN en trámite.

Abril de 2024.

Imagen de portada: Reactor nuclear Doel 1, Bélgica. | Fotografía: Trougnouf.



Contenido

Resumen ejecutivo | **5**

La apuesta por la energía nuclear y sus contradicciones | **7**

Disponibilidad del combustible | **9**

Gestión de residuos | **13**

Requerimientos de materiales, energía fósil
y emisiones de gases de efecto invernadero | **15**

Costos de la fuente nuclear | **17**

¿Qué tanto puede crecer la generación nuclear? | **19**

La energía nuclear no contribuye a un mundo
más democrático y descentralizado | **22**

La energía nuclear en México | **24**

Conclusiones y recomendaciones de política pública | **30**

Enlaces de interés | **33**

Listado de figuras | **36**

Referencias bibliográficas | **37**



Resumen ejecutivo

La energía nuclear se ha planteado como una de las alternativas para descarbonizar el sistema eléctrico y combatir con ello el cambio climático. Aunque en efecto tiene varias ventajas, como la alta densidad energética del uranio, un alto factor de planta y el no emitir gases de efecto invernadero durante su operación, presenta numerosos obstáculos que la hacen inviable para México. Entre los problemas se encuentran:

- La construcción de plantas nucleares toma mucho tiempo —entre 10 y 15 años— y supone costos muy altos de inversión inicial.
- Alternativas como los pequeños reactores modulares no necesariamente son soluciones a escala o reducen los costos de inversión. Los reactores basados en torio —otra alternativa tecnológica— no han sido probados a escala y tienen costos aún mayores, lo que los hace una opción poco viable en el corto y mediano plazo.
- Si bien la energía nuclear es una fuente de energía con un alto factor de planta, es muy poco flexible. Esto limita su uso a funcionar como carga base en la generación eléctrica, sin poder compensar la variabilidad de las fuentes renovables modernas.
- Además, la electricidad representa 23 % del consumo total de energía en México, y la energía nuclear sólo podría contribuir a reducir emisiones en dicho ámbito.
- El uranio —mineral indispensable para el combustible nuclear— es un recurso finito, con implicaciones geopolíticas y socioeconómicas

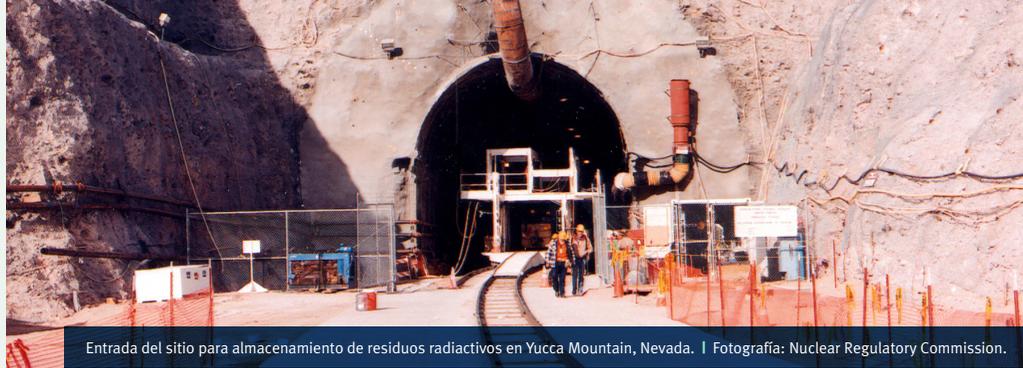
importantes. México tiene reservas muy limitadas, ocupa el lugar 41 del listado mundial, y no cuenta con una industria para la producción de combustible nuclear.

- El aprovechamiento de la energía nuclear implica la emisión de cantidades significativas de gases de efecto invernadero asociadas a la minería, el transporte y el procesamiento de uranio, así como a la construcción de la central, que necesita grandes cantidades de concreto.
- La energía nuclear demanda importantes cantidades de agua y produce a su vez residuos radiactivos que pueden producir fuertes impactos socioecológicos y para los cuales no se ha encontrado todavía una solución segura.
- Por más segura que sea la tecnología, la energía nuclear está sujeta a errores humanos, a la exacerbación de fenómenos hidrometeorológicos por la crisis climática y a riesgos geológicos — como sismos o erupciones volcánicas — que podrían tener impactos devastadores e irreversibles.
- La construcción de plantas y su mantenimiento sólo puede desarrollarse si el sistema energético está fuertemente centralizado y depende de una autoridad que garantice altos niveles de seguridad, lo que va en contra de la democratización y descentralización del sistema energético.
- La energía nuclear se alinea con el imaginario del desarrollo y crecimiento económico infinitos, imposible en términos físicos y dañino para el medioambiente. En su lugar se debería impulsar una transición energética democrática que atienda las necesidades prioritarias de la mayoría y que disminuya el consumo tanto de energía como de materiales para reducir con ello los impactos socioambientales.

La apuesta por la energía nuclear y sus contradicciones



Entrada del depósito de almacenamiento geológico profundo de Onkalo, Filadelfia. | Fotografía: Jan Loskot.



Entrada del sitio para almacenamiento de residuos radiactivos en Yucca Mountain, Nevada. | Fotografía: Nuclear Regulatory Commission.

La apuesta por la energía nuclear y sus contradicciones

Este cuaderno temático presenta una evaluación crítica de la energía nuclear como una opción para la generación de electricidad en México. De forma reciente se han publicado propuestas que promueven la energía nuclear como una tecnología viable para el país, las cuales destacan su carácter como fuente de energía baja en carbono y su capacidad para aminorar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), responsables de la crisis climática. Asimismo, la energía nuclear se ha presentado como una forma de incrementar la soberanía energética, es decir, la capacidad del país para reducir su dependencia de la importación de combustibles y satisfacer las demandas energéticas mediante la producción nacional (Romero, 2023). Sin embargo, las aseveraciones sobre los grandes beneficios de la energía nuclear suelen dejar de lado muchos de los problemas que surgieron desde que inició su fase de expansión comercial a gran escala hace 60 años. A pesar de su alta densidad energética y ausencia de emisiones de GEI en la generación de electricidad, algunos de los problemas y limitaciones de la fuente nuclear son: 1) la disponibilidad del combustible, 2) la gestión de los residuos, 3) los requerimientos de materiales, energía fósil y emisiones de GEI, 4) los altos costos de capital inicial, 5) las limitantes en su despliegue a gran escala y 6) el condicionamiento a un modelo centralizado, poco democrático y basado en el crecimiento perpetuo.

A nivel global, la industria de la energía nuclear se está reduciendo. El último reporte sobre su estado (Schneider, 2023) argumenta que ha sufrido una de las mayores caídas en décadas. Tan sólo en 2023 la generación de

energía a nivel global se redujo en un 5 %, y la generación de electricidad nuclear disminuyó en un 9.2 %, con un total 407 reactores en operación alrededor del mundo; esto implicó una disminución de 31 reactores por debajo del máximo que se alcanzó en 2002, y sólo China mostró un aumento del número de reactores en construcción (Schneider, 2023). En el resto del mundo los reactores planeados han experimentado retrasos y altos costos de construcción; en su mayoría todos los nuevos reactores se están construyendo en países con capacidad nuclear o por compañías basadas en dichos países. En suma, hoy se están cerrando más reactores de los que se están proponiendo, y se está optando en su lugar por tecnologías como la solar fotovoltaica y los aerogeneradores eólicos (Schneider, 2023). Aun cuando estas alternativas merecen ser evaluadas de forma crítica para tomar en cuenta sus respectivas limitaciones,¹ este cuaderno se enfoca sólo en las limitaciones y los beneficios que podría aportar la adopción de la energía nuclear en un país como México, a partir de una evaluación de las condiciones de dicha fuente a nivel mundial.

Disponibilidad del combustible

La primera gran limitante de la energía nuclear tiene que ver con la disponibilidad del combustible necesario para su generación. La energía nuclear es una fuente no renovable, ya que el combustible se produce a partir de uranio, cuyas reservas son finitas. Los yacimientos con características adecuadas se encuentran en pocos lugares del planeta. Por este motivo, el 92 % de la producción proviene de siete países, entre los cuales tan sólo Kazajistán representa el 45 % de toda la producción (figura 1). Aunque las reservas de uranio ya identificadas podrían alimentar las plantas nucleares existentes por un aproximado de 127 años (WNA, s.f.a), el pico de la producción de uranio se alcanzó en 1980 con casi 70,000 toneladas/año (figura 2) (WNA, 2023). Después de la disminución que siguió a la caída de la Unión Soviética en 1991 —entonces el mayor productor—, hubo un repunte seguido por un segundo pico en 2016 de alrededor de 62,000 toneladas/año, en buena medida por la recuperación de uranio *in situ* que reemplazó al método tradicional de obtención a través de minas. Desde entonces la producción ha bajado y en 2022 fue de cerca de 49,000

¹ Para una revisión detallada de los beneficios y límites de las energías renovables, véase Ferrari y colaboradores (2024).

toneladas/año (WNA, s.f.b). Desde 1991 la extracción de uranio es inferior a los requerimientos mundiales de los reactores nucleares existentes, excepto durante 2016, cuando se llegó a un equilibrio. El déficit se ha estado cubriendo con los inventarios disponibles a partir del reprocesamiento del plutonio procedente del desmantelamiento de las armas nucleares —sobre todo de la antigua Unión Soviética— y, en menor medida, con el reciclaje del combustible. Se estima que para cumplir con los requerimientos de las centrales existentes y los programas anunciados hasta 2040 —que prevén un 58% de crecimiento— se consumirá alrededor del 87% del total de los recursos identificados en 2019 (figura 2) (Grancea *et al.*, 2020).

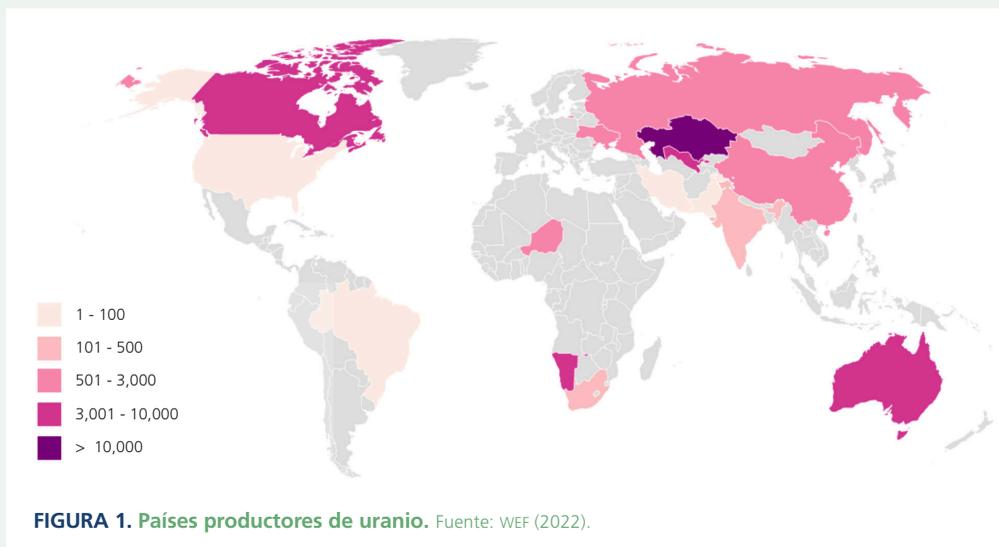


FIGURA 1. Países productores de uranio. Fuente: WEF (2022).

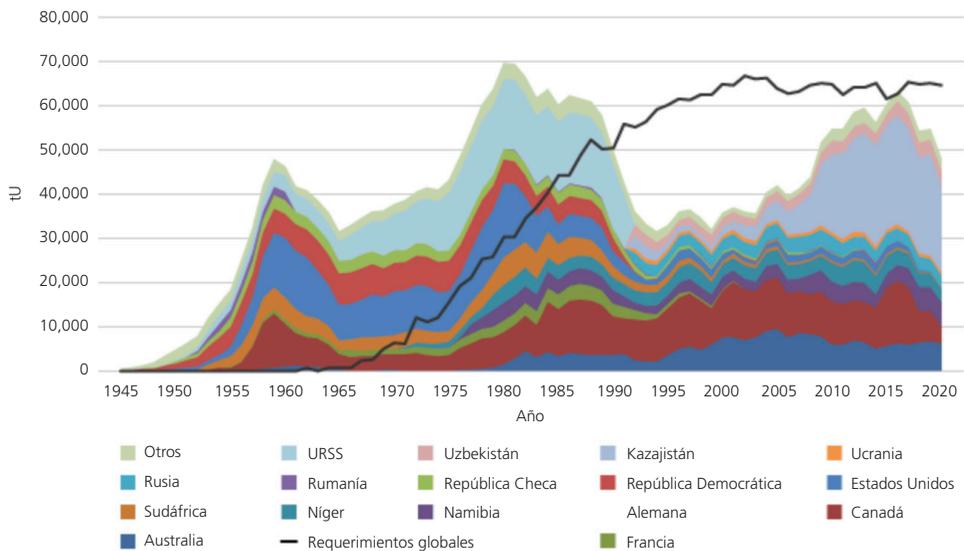


FIGURA 2. Producción de uranio por país y requerimientos mundiales. Fuente: WNA (2023).

Por otro lado, es importante considerar los límites materiales de la producción de uranio y el impacto geopolítico de la extracción de este mineral. Al igual que en la explotación de cualquier recurso finito, la tendencia natural es explotar primero los yacimientos con mayor ganancia económica —es decir, los de mayores concentraciones de uranio y menores costos de extracción—, por lo que con el tiempo la producción se vuelve más cara y difícil. En la actualidad diez compañías acumulan el 96 % de la producción de uranio a nivel global, mientras que el 95 % de las reservas identificadas a nivel global se encuentra en dieciséis países (WNA, s.f.b). El precio del uranio se elevó con rapidez a partir de 2005 —en línea con los precios del petróleo— y llegó a un máximo en 2008-2009. Tiempo después cayó tras el accidente de la planta nuclear de Fukushima en 2011, así como por la disminución en la demanda ocasionada por el cierre de algunas centrales y por la cancelación de nuevos proyectos (Ferrari *et al.*, 2024a, p. 101). El conflicto en Ucrania (2022-) ha elevado de manera sustancial los precios del uranio y se prevé que seguirán incrementándose en el futuro cercano. Esta distribución geográfica está propiciando nuevos intereses

neocoloniales y extractivistas en ciertas regiones, como lo ejemplifican las intervenciones militares de Francia en África Occidental para garantizar la producción de Níger, país que aporta cerca del 20% del uranio del que dependen sus 56 reactores nucleares, con una demanda de cerca de 8,000 toneladas anuales (Maad, 2023).

En los últimos años, el concepto de reactores basados en torio ha resurgido en los debates sobre la transición energética, y se ha presentado a este mineral como una alternativa viable e incluso “verde” (NFFF *et al.*, 2020). Escalar el uso del torio —un metal de mucho mayor abundancia en la corteza terrestre y de más fácil extracción que el uranio— supone, por un lado, disminuir algunos de los riesgos más críticos del uso de uranio como su empleo para la elaboración de armas nucleares.² Por otro lado, se reducirían los desechos radiactivos, si bien el torio, después de ser bombardeado con átomos de uranio, sigue siendo un material radiactivo de larga duración, aunque con menor tiempo de radiactividad que el uranio (WNA, 2020). Un reactor alimentado con torio necesita uranio para la fisión, pero produce menos residuos transuránicos, con lo cual se reduce el tiempo de la radiactividad. Sin embargo, estos residuos emiten más radiación, lo que complica su transporte y almacenamiento. La propuesta que se ha formulado es utilizar como combustibles los residuos nucleares transuránicos de larga vida —provenientes de los reactores de primera y segunda generación— para deshacerse de estos residuos y generar energía, lo que, sin embargo, es muy cuestionable y no ha sido probado a escala (NFFF *et al.* 2020, p. 43).

A pesar de que Estados Unidos ha intentado desarrollar el torio como una fuente de energía durante los últimos 70 años, ninguno de los diseños existentes de reactores ha probado ser viable a nivel comercial y, de ser adoptados como una alternativa, requerirían grandes inversiones y subvenciones públicas (UKNNL, 2010). La adaptación del torio como combustible para su uso en los reactores existentes requeriría asimismo una inversión económica muy alta. Por lo tanto, presentar el torio como una “bala de plata” capaz de convertir al instante a la industria nuclear en una fuente de energía a prueba de catástrofes, libre de residuos y libre de preocupaciones de proliferación es no sólo inexacto, sino irrealizable en términos de costo y tiempo.

² Aunque el torio tiene menores usos militares, al ser bombardeado con neutrones en un reactor nuclear transmuta en uranio 233, el cual puede ser utilizado en armas nucleares. Para más detalles, véase Edwards (s.f.).

Gestión de residuos

Uno de los principales problemas de la energía nuclear es la gestión de los residuos, ya que se trata de materiales que pueden emitir radiación por miles de años. Las plantas de energía nuclear son fuente de desechos radiactivos y a la fecha no existe un consenso sobre cómo y dónde almacenarlos de forma segura a largo plazo. Los desechos radiactivos pueden requerir hasta 24,000 años para degradarse y perder su radiactividad. Mientras tanto, se estima que existen más de 350,000 toneladas de residuos de alta radiactividad que esperan ser depuestos de forma segura, cifra que aumentará en 10,000 toneladas anuales con la capacidad instalada actual (NFFF *et al.*, 2020, pp. 44-45).

En la gestión de residuos, el primer paso es depositar el combustible que ha sido retirado del reactor en lo que se conoce como almacenamiento temporal intermedio (ATI), que son piscinas de enfriamiento en concreto armado que se llenan de agua ligera para absorber la radiación alfa, beta, gamma y neutrónica. Después los residuos se deberían transportar a un almacenamiento geológico profundo (AGP), que son áreas subterráneas en las que las rocas presentan baja o nula permeabilidad con el fin de contener y aislar los desechos radiactivos.

Desde hace ya 30 años existen proyectos multilaterales para ubicar y desarrollar AGP, pero, a excepción del sitio de Onkalo en Finlandia, en fase final de desarrollo, no hay ningún AGP operando en el mundo. En el resto del planeta los residuos se almacenan en recipientes sellados sumergidos en piletas anexas a los reactores —mismos que no están diseñados ni tienen capacidad para su almacenamiento a largo plazo— a la espera de ser llevados a su emplazamiento final en los AGP. En el caso de Estados Unidos, el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés) ha gastado cerca de 8 mil millones de dólares en estudiar el sitio de Yucca Mountain en Nevada, y ha prácticamente abandonado el proyecto desde 2016. Según la propia estimación del DOE, el costo para construir y operar el AGP en Yucca Mountain podría alcanzar los 97 mil millones de dólares. La proliferación de desechos abre además la posibilidad de robos de este material por grupos criminales para actos terroristas o usos bélicos (Beyond Nuclear, 2024).³

³ Destaca la controversial decisión de Estados Unidos de enviar armamento con uranio empobrecido a las fuerzas militares de Ucrania como parte de la contraofensiva hacia Rusia (Al Jazeera 2023).

Las plantas nucleares y la extracción de uranio tienen un largo historial de accidentes, desplazamientos y exposiciones desiguales a la radiactividad, los cuales han afectado sobre todo a poblaciones subalternas —pobres, racializadas, mujeres y/u otras minorías.⁴ Esto perpetúa una lógica colonial e imperialista al designar cuáles son y quiénes habitan en las zonas de sacrificio necesarias para reproducir y extraer este material (NFFF *et al.*, 2020, pp. 12-18).⁵

La minería del uranio en sí misma es un proceso que deja importantes residuos radiactivos (NFFF *et al.*, 2020, pp. 12-13). Los dos métodos de extracción de uranio —a través de minas bajo tierra o a cielo abierto— dejan enormes cantidades de partículas radiactivas. Además, los pozos perforados en las minas bajo tierra pueden conectarse con sistemas de aguas subterráneas, contaminar el agua potable y dañar a cualquier organismo que entre en contacto con ella, aunque sólo esté expuesto a bajas dosis de radiación. En el caso de minas a cielo abierto, el polvo liberado durante la extracción de uranio está repleto de partículas radiactivas, las cuales pueden ser una de las principales causas de incidencia de cáncer de pulmón entre los mineros. Más aún, el viento y la lluvia pueden incluso transportar partículas radiactivas a regiones donde nunca se ha extraído uranio, como resultado de perforaciones, vertederos, presas de residuos o minas abandonadas. La exposición a la radiación, así sea asociada a los residuos de la generación de energía nuclear o a las minas de uranio pueden inducir problemas de fertilidad en las mujeres, instancias de leucemia en las infancias, así como otras manifestaciones de cáncer, problemas cardiovasculares o inmunodeficiencias en poblaciones mayores (NFFF *et al.*, 2020, pp. 12-13).

⁴ En la siguiente sección se habla con más detalle sobre los impactos socioecológicos. Para más información sobre el impacto en mujeres y niños, véase *Beyond Nuclear* (2019a).

⁵ Los ejemplos no sólo incluyen zonas de accidentes como Chernobyl, la Isla de Tres Millas o Fukushima, sino la contaminación de sitios por pruebas de armas nucleares, como el desierto en Nuevo México a raíz del proyecto Manhattan, las zonas en las que se han derramado residuos de la generación y el uso de armas como la Nación Navajo, así como Nuevo México, donde se vertieron más de 90 millones de galones de residuos de uranio en 1979. Para más información, véase *Climate False Solutions* (2021), pp. 33-34.

Requerimientos de materiales, energía fósil y emisiones de gases de efecto invernadero

Como sucede con las fuentes renovables, la infraestructura para el aprovechamiento de la energía nuclear depende en gran medida de combustibles fósiles para la producción del combustible y la construcción de la planta. El combustible nuclear debe fabricarse a partir de la extracción y concentración de uranio, lo que requiere un largo proceso que involucra minería y procesamiento con grandes cantidades de energía de origen fósil. La tendencia natural es explotar primero los yacimientos con mayor ganancia económica, por lo que con el tiempo la producción se vuelve más cara, difícil y con un alto costo energético que depende de los combustibles fósiles. Asimismo, la construcción de las centrales nucleares, su posterior desmantelamiento y la disposición a largo plazo de los residuos requieren ingentes cantidades de energía, cemento, acero y otros materiales intensivos en energía de origen fósil. Tan sólo el edificio que protege el reactor nuclear es una bóveda de contención con dos muros de hormigón armado, cada uno de los cuales tiene un espesor de 1.3 metros. El blindaje del muro exterior está diseñado a prueba de colisiones aéreas, tanto de aviones militares, como de grandes aviones comerciales. La altura del edificio de contención es del orden de los 63 metros y el ancho, de los 49 m. Otras partes de las centrales que utilizan grandes cantidades de concreto son las torres de enfriamiento. Por supuesto, todo lo anterior —además de requerir importantes cantidades de energía fósil— produce emisiones de GEI que a su vez deben ser contabilizadas (Ferrari *et al.*, 2024a, pp. 98-100).

Muchos promotores del proceso de descarbonización⁶ —que cobró fuerza a partir de la firma del Acuerdo de París en 2015— han impulsado la energía nuclear como una alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático. La Agencia Internacional de Energía (AIE) y otras organizaciones internacionales han resaltado el papel de la energía nuclear como una alternativa ‘limpia’ para reducir los GEI y complementar los aportes de la energía solar fotovoltaica y los aerogeneradores eólicos. De hecho, presentar la energía nuclear como ‘limpia’ sólo es cierto si se toman en cuenta las emisiones de GEI durante el proceso de generación de electricidad. Si se considera todo el ciclo de vida de una central nuclear, las emisiones

⁶ El término *descarbonización* significa dejar de usar combustibles fósiles y eliminar la dependencia de ellos.



Fotografía: Clean Energy Economy MN.



Fotografía: Nuclear Regulatory Commission.

comienzan a acumularse. El largo y complejo proceso de minar uranio, su transporte a escala global, los procedimientos para llegar a las concentraciones requeridas, la construcción de las centrales nucleares, su demolición y la de los complejos clausurados al final de su vida útil, así como el transporte y almacenamiento de los residuos nucleares también generan emisiones de GEI. Asimismo, las reservas más efectivas de uranio ya han sido explotadas, por lo que la minería de las reservas de menor grado implica una mayor inversión de energía, lo que a su vez produce una mayor cantidad de emisiones. Es cierto que en el ámbito de la generación de energía eléctrica la nuclear emite menos GEI que los combustibles fósiles, pero incluso así genera emisiones promedio de 66 gramos de $\text{CO}_2\text{e/kWh}$ (IPCC, 2014). Si analizamos el ciclo de vida entero de otras tecnologías bajas en carbono, las emisiones de la energía nuclear son superiores a las de plantas de energía eólica y solar a pequeña y mediana escala, ya que, incluso después del cierre de un reactor, las actividades de desmantelamiento, transporte y almacenamiento de residuos radiactivos generarán GEI durante al menos 10 a 20 años.

Por otro lado, se debe considerar que las centrales nucleares dependen del uso de vastas cantidades de agua. Reactores de tamaño cercano a 1 GW —como los ubicados en Laguna Verde, Veracruz— consumen entre 1,900 y 5,800 millones de litros de agua por día, lo que es preocupante en un contexto de creciente escasez hídrica, así como por la posible competencia con el aumento en la demanda de agua para fines de consumo humano y agrícola asociado al incremento de la temperatura (Beyond Nuclear, 2019b).⁷

⁷ Véase también Breña y (2007).

Costos de la fuente nuclear

La construcción de una planta nuclear requiere grandes capitales y largos periodos de tiempo. Las inversiones iniciales —asociadas a la preparación del sitio, ingeniería, fabricación, construcción y puesta en marcha— son mucho mayores que los costos operativos —la adquisición del combustible, el mantenimiento y la disposición de los residuos radiactivos—. Esto se debe a que las centrales nucleares son muy complejas a nivel técnico y deben cumplir estrictos requisitos de seguridad en términos de licencia y de diseño. En términos económicos, mientras los costos de operación de una planta nuclear disminuyen con el tiempo, el costo inicial de un reactor nuclear comercial típico implica inversiones de hasta 7 mil millones de dólares con una etapa de construcción que puede durar hasta más de 10 años (Beyond Nuclear, 2019b). Por otro lado, el tiempo que lleva la puesta en marcha de una central, desde su diseño hasta su operación, es de 10 a 15 años, lo que agrava los costos de financiación, que pueden llegar a ser significativos. La construcción de centrales nucleares es característica de grandes proyectos de infraestructura donde los costos y tiempos de entrega tienden a subestimarse. El costo de la gestión de residuos también debe considerarse y, como vimos en el caso de Yucca Mountain, no es menor.



La minería de uranio tiene un impacto socioecológico importante. | Fotografía: Alberto Otero García.

Estos dos factores —el altísimo costo de inversión inicial y el largo tiempo de construcción— han limitado la expansión de las plantas nucleares, ya que dependen de enormes subsidios de los gobiernos y de brindar toda una serie de incentivos “especiales” a las compañías privadas (SGR 2023). Al ser los costos de inversión de los reactores uno de los principales retos de la expansión de la energía nuclear, la industria ha formulado propuestas para despegar pequeños reactores modulares (SMR, por sus siglas en inglés). Los SMR son reactores de entre 10 y 300 MW que se fabrican en una cadena de producción para luego ser transportados a los lugares de generación, lo que reduce el tiempo de construcción *in situ*.⁸ Sin embargo, en última instancia estos reactores están sujetos a las mismas problemáticas que las grandes plantas en cuanto a inflexibilidad en la generación, residuos y seguridad; es decir, no resuelven los principales problemas de las centrales a mayores dimensiones, salvo por el costo inicial de capital. Además, esta tecnología existe desde los años cincuenta para fines militares y el hecho de que no hayan tenido mayor difusión comercial es indicativo de los problemas técnicos y económicos que conllevan (Little, 2023).⁹ Por ejemplo, el reactor de 50 MW de La Crosse, Estados Unidos, que funcionó de 1968 a 1986, generó electricidad a un costo tres veces superior al de una central de carbón situada al lado. El costo no subsidiado del proyecto basado en SMR del Sistema de Energía Municipal de Utah se ha duplicado respecto al costo previsto al inicio (Schlissel, 2022). En consecuencia, la mayoría de los países que construyeron reactores pequeños terminaron ampliándose a reactores más grandes (Beyond Nuclear, 2018). Asimismo, como han mencionado ya varios críticos, los SMR pueden terminar siendo incluso más costosos que una central nuclear tradicional, ya que estos no se benefician de manera directa de una economía a escala como harían reactores tradicionales. Por ejemplo, un reactor de 250 MW no requiere 4 veces menos concreto que uno de 1 GW, ya que las cantidades necesarias para aislar las reacciones son similares (Beyond Nuclear, 2018).

⁸ De acuerdo con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), los pequeños reactores modulares pueden alcanzar una capacidad de hasta 10 MW, mientras que los SRM pueden alcanzar hasta 300 MW. Un reactor convencional suele estar por encima de los 700 MW. Para más información, véase OIEA (2020).

⁹ Para un ejemplo de los costos, véase Morton (2023).



La complejidad y la naturaleza centralizada de la energía nuclear obstaculizan un modelo más democrático y sostenible. | Fotografía: Yovko Lambrev.

¿Qué tanto puede crecer la generación nuclear?

El geógrafo Vanclav Smil denomina el uso de energía nuclear como un ‘fracaso exitoso’ debido a que la expectativa de generar energía barata y abundante desde hace 70 años no se ha cumplido. El proyecto de generar electricidad con reactores nucleares se estancó durante la década de 1980 debido a problemas económicos, retrasos en la construcción y la multiplicación de accidentes en las centrales con los casos de Three Mile Island en Pensilvania y Chernobyl en Ucrania, que han recibido gran interés y atención pública después del accidente de Fukushima en Japón. Estos casos proporcionan evidencia suficiente de los enormes riesgos sociales y ecológicos y así como las pérdidas económicas a los que puede conducir la operación de las plantas nucleares. En los últimos 40 años, los costos de instalación se han multiplicado, año con año siguen acumulándose tanto los residuos nucleares como los costos para mantenerlos sin un sitio adecuado, y los riesgos de desastres nucleares pueden incrementarse debido al cambio climático y algunos de sus efectos asociados — como el aumento de la temperatura, el incremento del nivel del mar o la escasez hídrica— (Beyond Nuclear, 2019b).

A nivel internacional y en particular en los países generadores de energía nuclear —Canadá, Francia y Estados Unidos—, se han generado expectativas desproporcionadas en torno a la fusión nuclear, los SMR y la generación a partir de torio. Esta propaganda responde evidentemente a intereses de compañías mineras y de un pequeño grupo de empresas privadas.¹⁰ Hoy, la energía nuclear ya no puede competir con otras fuentes de generación de electricidad. Las inversiones en la construcción de nuevos reactores nucleares son cada vez más caras y arriesgadas. Programas de transición a la energía nuclear se han cancelado o suspendido sobre todo por razones económicas, por ejemplo en Chile, Indonesia, Jordania, Lituania, Sudáfrica, Tailandia y Vietnam (NFFF *et al.*, 2020, pp. 47-48), mientras que las centrales nucleares existentes ya no pueden competir contra los bajos costos de otras tecnologías como la solar y la eólica —aunque éstas también suelen ocultar otros costos para compensar la variabilidad de la generación y los impactos socioecológicos más allá de la generación de energía eléctrica.

Cuando se consideran las limitaciones de la disponibilidad de uranio, los costos de la infraestructura y el tiempo de construcción se llega a la conclusión de que es casi imposible incrementar de forma significativa la generación nuclear en los tiempos cortos que requiere la crisis climática. Veamos algunos escenarios. En 2022 la generación nuclear fue de 2,682 TWh a partir de alrededor de 410 reactores que aportaban el 4.2% de la energía consumida en el mundo, es decir, el equivalente al 10% de la generación eléctrica a nivel mundial (BP, 2022). Ese mismo año, se terminaron de construir y comenzaron a generar energía eléctrica sólo 7 reactores. Si quisiéramos duplicar la generación de energía nuclear actual para 2050, se necesitaría agregar 16 nuevos reactores cada año o más de dos veces la tasa actual. Ahora bien, para contribuir a limitar el incremento de temperatura del Acuerdo de París, las estimaciones más conservadoras apuntan a que se

¹⁰ A finales de 2022, el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) en California desarrolló por primera vez un proceso para generar energía nuclear a través de la fusión nuclear. La reacción que genera energía en el uso de la energía nuclear implica una fisión, es decir, la separación de átomos inestables como el del uranio, lo que libera una importante cantidad de energía en forma de calor. El proceso de fusión, hace lo contrario, al fusionar dos átomos en vez de separarlos. La fusión alcanzada por el LLNL produjo 1.5 veces la cantidad de energía que se introdujo para generar la reacción, pero esto sólo se refiere a la energía del láser que se utilizó para desencadenar la reacción. La energía necesaria para generar temperaturas de más de cien millones de grados fue el producto de un conjunto de 192 láseres de alta potencia, que necesitaron más de 100 veces más energía para funcionar. Es decir, este experimento, que se realizó en un ambiente controlado, no ofrece una alternativa a la escala necesaria en el corto, mediano e incluso en el largo plazo, además de que sus costos energéticos y económicos son muy altos. Para más información, véase Tokar (2023).



Fotografía: John Menadue.



Fotografía: Chris Woodford.

necesitarían entre 600 y 700 nuevos reactores en operación para 2050 (NFFF *et al.*, 2020, p. 45), lo que implicaría construir entre 23 y 26 reactores nuevos cada año, es decir, hasta 3 o 4 veces la tasa de construcción actual. Además de los problemas logísticos y de la dependencia de enormes subsidios públicos, este escenario supone que la participación de la energía eléctrica en la matriz de consumo de energía mundial pasará de representar el 20% —en la actualidad— a más del 50% en 2050 (IEA, 2022) sobre todo a través de la electrificación intensiva de sectores como el de transporte y el industrial, una meta que también ha sido cuestionada.¹¹

En suma, la energía nuclear se ha convertido en una opción cara, poco realista y cada vez más riesgosa, con probabilidades de provocar un desastre conforme estos reactores envejecen —recordemos que dos tercios de los reactores existentes tienen más de 30 años, mientras que el 20% tiene más de 40— (Schneider, 2023). Incluso cuando se puede argumentar que los reactores de tercera generación y los SMR pueden hacer más factible incrementar la producción nuclear, se trata de tecnologías todavía en desarrollo que con dificultad marcarían una diferencia apreciable en el panorama energético de las próximas décadas.

¹¹ En el artículo de Millward-Hopkins y colaboradores (2020), se argumenta que los niveles actuales del uso de la energía sustentan numerosas amenazas existenciales, incluidas crisis ecológicas, escasez de recursos e inestabilidades geopolíticas, debido a que la economía mundial es dependiente del crecimiento económico. Los autores muestran cómo el aumento en el consumo energético no ha mejorado de forma sustancial el bienestar social, sino que ha exacerbado las desigualdades y, con ello, ha afectado de manera desproporcionada a los más desfavorecidos. Algunos países logran resultados sociales elevados con un consumo de energía mucho menor, al desplazar la producción a otros países. Sin embargo, en la actualidad ningún país puede alcanzar altos resultados sociales sin sobrepasar los límites planetarios.



Una gestión comunitaria y democrática de la energía implica el uso de otras fuentes. | Fotografía: Black Rock.

La energía nuclear no contribuye a un mundo más democrático y descentralizado

Desde un punto de vista exclusivamente técnico, la energía nuclear está muy por encima de las fuentes renovables en cuanto a densidad energética y factor de planta. Se estima que la densidad energética del combustible nuclear es hasta 6 órdenes de magnitud mayor que la densidad de los combustibles fósiles y cerca de 8 veces la de las fuentes renovables. Por otro lado, el factor de planta es cerca del 92 % (EIA, 2021), dado que, por sus características, una central nuclear no puede pararse y encenderse con rapidez, y se las hace funcionar casi de manera constante a su capacidad nominal. Si bien esto permite que la fuente nuclear se use como carga base en el sistema eléctrico, también limita su uso para soportar las variaciones de la demanda. De hecho, la energía nuclear tiene la menor flexibilidad y la peor velocidad de respuesta en comparación con todas las demás tecnologías energéticas (Beyond Nuclear, 2018).

La poca flexibilidad en cuanto a tamaño y operación, así como los riesgos asociados a trabajar con combustibles radiactivos son quizá los factores más importantes para considerar dos de los puntos más controvertidos y menos discutidos de la energía nuclear: 1) la necesidad de incorporar las plantas nucleares a sistemas centralizados y poco democráticos; y 2) la suposición de

una economía en constante crecimiento económico y de demanda energética. En lo que respecta a la discusión sobre la democratización de la energía, a diferencia de las fuentes renovables —solar, eólica y biomasa— una planta de energía nuclear sólo se puede operar como un proyecto centralizado y planificado por una gran empresa de Estado o privada, capaz de absorber los grandes costos iniciales y operar con la complejidad técnica y de seguridad necesarias. Tiene muy poco sentido pensar en plantas centralizadas en un contexto en el que los sistemas energéticos deben desempeñar un papel cada vez más importante en la descentralización, democratización y redefinición de necesidades y límites de consumo a nivel local. Las políticas de seguridad y soberanía energética que busquen centralizar la generación bajo el control exclusivo del Estado van en contra de una visión democrática del futuro.

Por otro lado, si se toman en cuenta sus problemas y riesgos, la propuesta de aumentar la energía nuclear sólo se justifica en un contexto de crecimiento continuo e insostenible de la demanda de minerales y energía, que lleva a buscar soluciones “desesperadas” para enfrentar la crisis climática. Éste es el caso de los escenarios de emisiones netas cero promulgados por las agencias internacionales, donde, al no poner límites al crecimiento económico, se requiere un aumento constante de las fuentes de generación de energía, así como de otras tecnologías y propuestas no probadas —como la geoingeniería— para mitigar el costo material y las emisiones de GEI. Sin embargo, mantener este tipo de escenarios basados en el crecimiento tiene impactos negativos en términos ecológicos, socioeconómicos y culturales y puede tener consecuencias no previstas (Hickel, 2022). Por el contrario, una transición energética justa y sustentable implicaría un cambio hacia la equidad y la suficiencia, acompañado por la reducción del consumo total de energía y recursos para algunos sectores con el fin de distribuir mejor el acceso a la energía (Ferrari *et al.*, 2024b).

La energía nuclear en México



Las centrales nucleares mantienen el mismo sistema centralizado y poco democrático que ya conocemos. | Fotografía: CEphoto, Uwe Aranas.



Fotografía: Kyle Miller.

La energía nuclear en México

México tiene una planta de energía nuclear ubicada en Laguna Verde, Veracruz, con dos reactores de 820 MW cada uno, los cuales suman una capacidad instalada total de 1640 MW. En 2022, Laguna Verde generó alrededor del 3.1% de la electricidad del país (figura 3). La capacidad instalada representa el 1.8% del total (Planeas, s.f.). En México, se estima que la electricidad representa el 23 % del consumo final energético nacional, por lo que, en términos del consumo final de energía, la energía nuclear representa el 1.7 % del total. A continuación se presentan varios aspectos problemáticos que limitan el desarrollo de la energía nuclear en México.

Primero, incluso cuando el país cuenta con reservas de uranio, éstas no son suficientes para justificar el desarrollo y extracción de una industria para su producción. El Sistema Geológico Mexicano (SGM) ha identificado yacimientos en Sonora, Durango, Chihuahua, Coahuila y Oaxaca; no obstante, la rentabilidad de estos yacimientos es dudosa, además de que serían apenas suficientes para satisfacer la demanda de los dos reactores existentes durante su vida útil (Martín y François, 2006). A nivel mundial no más de una decena de países tiene la capacidad de construir una central nuclear y son incluso menos los que producen el combustible — recordemos que son 7 países los que concentran el 90 % de las reservas de uranio—. México no está entre ellos y, en consecuencia, la decisión de explorar y extraer las reservas de uranio tendría importantes consecuencias socioecológicas que no necesariamente justifican su extracción.¹²

¹² La promoción de la exploración y minería de uranio, junto con la construcción de nuevos reactores en México, agudizarían los conflictos socioecológicos existentes. En la actualidad, se registran al menos 210 conflictos relacionados con la minería y la construcción de megaproyectos; además, desde 2019 se han documentado 154 asesinatos de defensores ambientales. Impulsar la exploración y minería de uranio así como la construcción de nuevos reactores aumentaría las amenazas de conflictos socioecológicos.

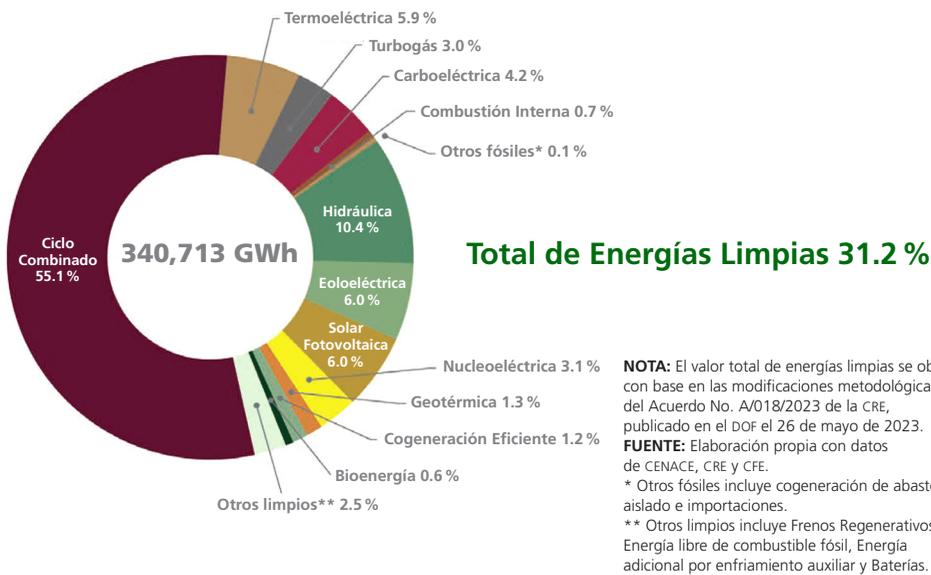


FIGURA 3. Generación de energía eléctrica por tecnología en México durante 2022. Fuente: Sener (2023).

Segundo, el alto riesgo sísmico, volcánico, geológico y meteorológico que caracteriza gran parte del territorio nacional constituye una fuerte restricción en lo que concierne a los sitios para ubicar una central nuclear. Además, México —como el resto de los países que han desarrollado este tipo de energía— no cuenta con ningún sitio seguro o probado para depositar los desechos nucleares. Tan sólo en los últimos años se han presentado problemas y fallas en la central de Laguna Verde, como la pérdida de electricidad (Godoy, 2020) y otros riesgos asociados al mal manejo del combustible y los residuos (Godoy, 2021). La gestión de los desechos también abre las posibilidades de un mal uso, lo cual es algo que, en México, dada la expansión de grupos de crimen organizado, podría significar un riesgo adicional que también requeriría planeación y costos adicionales para mantener medidas de seguridad.

Tercero, si se considera que México está a punto de ser declarado un país con escasez hídrica (Agua, s.f.), la construcción de nuevas centrales aumentaría la demanda de agua y fomentaría la competencia frente a otros usos como el de consumo humano y la producción de alimentos. Lo anterior también aplica a los pequeños reactores modulares que, además de demandar agua, serían susceptibles a los mismos riesgos socioambientales.



Cuarto, la energía nuclear va en contra del espíritu de una transición socioecológica democrática y necesaria para el país al reproducir la idea de un sistema eléctrico centralizado por un Estado capaz de absorber los grandes costos iniciales de las plantas y operarlas con la complejidad técnica y de seguridad que conlleva. Invertir en esta tecnología sería muy costoso para el Estado mexicano, quien tendría que subsidiar e invertir gasto público durante años en la construcción de las plantas. Entre otros problemas, este gasto retrasaría la implementación de otras medidas para reducir la demanda energética —como inversiones en aislamiento de viviendas o dispositivos de uso final—, así como la adopción fuentes de energía como la solar y la eólica que, aunque también tienen limitantes técnicas y socioecológicas,¹³ representan la posibilidad de transitar hacia un modelo de generación de energía democrático y soberano (Ferrari *et al.*, 2024a, p. 98).

¹³ Las tecnologías bajas en carbono a partir de fuentes renovables como la solar y la eólica presentan limitantes técnicas como la intermitencia —no operan de forma continua— y una dependencia de la explotación de minerales ‘críticos’ para su construcción y funcionamiento como el litio —para el almacenamiento de energía eléctrica en baterías—, cadmio, níquel, cobalto, manganeso, aluminio, cobre, indio, telurio y otras tierras raras. La extracción de estos minerales depende de combustibles fósiles que, al igual que el uranio, muestran una tasa de retorno decreciente, por lo que, al agotarse las reservas más próximas a la corteza terrestre, cada vez se tiene que realizar un mayor gasto energético para explotar las reservas que se encuentran a mayor profundidad. La cadena de ensamblaje, producción e instalación de estas tecnologías también depende de combustibles fósiles. De la misma forma, la tecnología solar fotovoltaica y los aerogeneradores eólicos requieren importantes extensiones de espacio para obtener energía, lo que también supone un impacto asociado a su expansión territorial, en competencia con tierras agrícolas, de uso habitacional o para otras actividades sociales o productivas.



Cada año se generan 10,000 toneladas de residuos nucleares que no sabemos dónde poner. | Crédito: Daniel Iova.

Por último, y en línea con el punto anterior, la energía nuclear no sería una opción para solucionar otros problemas que aún presenta el sistema eléctrico nacional (SEN) como la dependencia de combustibles importados o la necesidad de brindar electricidad de manera más accesible y descentralizada a la población. Por el lado de los combustibles, solo se sustituiría una parte del gas natural importado por el uranio, también importado. Y, como se mencionó anteriormente, al ser una fuente centralizada, la energía nuclear no ayudaría a mejorar el acceso a la energía en zonas sin acceso a la energía o reducir las desigualdades energéticas que resultan de la mala distribución y la falta de acceso justo a la energía (Ferrari, 2024).

Por estas razones, a pesar de los beneficios que la tecnología nuclear pueda ofrecer para la generación de energía baja en carbono o como fuente de potencia y carga base ante el aumento de las renovables intermitentes, la energía nuclear no puede considerarse una alternativa viable para promover una transición energética en México ni en términos de mitigar el cambio climático, ni en términos económicos, ni para garantizar una seguridad energética

del país a largo plazo. Una verdadera transición energética justa, sustentable y soberana requiere mucho más que un simple cambio tecnológico: implica un uso más mesurado de la energía, la descentralización y democratización basadas en energías renovables a pequeña y mediana escala —y no sólo para producción de electricidad—, pero sobre todo, un modelo que cuestione los privilegios, derroches y desigualdades energéticas, con miras a reducir la pobreza energética a través de una redistribución de la energía mal utilizada en el transporte individualizado de personas, en el movimiento de mercancías y los procesos industriales enfocados a la exportación, de modo que esa energía se redirija hacia la construcción de economías locales que atiendan las necesidades básicas de la población. La instalación de más centrales eléctricas a gran escala no abonará a proponer un futuro energético como éste, sino a mantener el modelo desigual actual.

Conclusiones y recomendaciones de política pública





Los impactos sociales y ecológicos de la cadena de producción de la energía nuclear deben ser contabilizados y sopesados con sus ventajas sobre otras fuentes. | Fotografía: Alberto Otero García.

Conclusiones y recomendaciones de política pública

El repaso de los beneficios, retos, limitaciones y problemas de la energía nuclear en México y en el mundo demuestra que —aunque sea una fuente baja en carbono para la generación de energía eléctrica o aunque ofrezca una carga base constante que puede ser útil al integrar energías intermitentes en la matriz eléctrica— esta tecnología no es una opción viable en términos económicos, no es una fuente de energía segura y libre de riesgos, no permitiría mitigar de forma significativa las emisiones de GEI e implica un retroceso en una política que busque democratizar y asegurar la soberanía energética del país.

Como se explicó a lo largo de este cuaderno temático, los costos económicos de instalación, construcción y operación de la energía nuclear son muy altos, y los periodos de construcción de los reactores son muy extensos. Esto implicaría un impacto significativo en el gasto público con pocos beneficios en la matriz de generación eléctrica o en la mitigación de GEI en el futuro cercano. El análisis indica también que la energía nuclear no podría atender otros problemas apremiantes de la transición energética en México como la pobreza y la desigualdad energética. A su vez, la apuesta por la energía nuclear desviaría recursos que podrían emplearse para reducir la demanda de electricidad, promover la eficiencia energética o desarrollar tecnología e infraestructura para el aprovechamiento de energías renovables a nivel local —solar, eólica, hidráulica o biomasa—, con lo cual se contribuiría a descentralizar, democratizar y proponer un sistema energético más justo y sustentable.



El desastre nuclear de Fukushima Daiichi, Japón. | Fotografía: International Atomic Energy Agency (IAEA) Imagebank.

Más que seguir promoviendo la construcción de plantas nucleares, la política energética de México debería orientarse a impulsar los cambios que se requieren de manera impostergable para asegurar la viabilidad y la sostenibilidad del sistema eléctrico nacional a largo plazo y promover una transición energética social y ecológicamente justa y sustentable. Lo anterior implica cambios estructurales para ayudar a mitigar los efectos del cambio climático y garantizar mayor seguridad e independencia energéticas. Asimismo, sería la base de una política y un sistema energético más participativo y diverso, basado en energías renovables locales, con menores desigualdades en el consumo y con una garantía de una mejor calidad de vida para las generaciones presentes y futuras. En el contexto actual, impulsar el despliegue de un mayor número de reactores y plantas nucleares iría en contra del espíritu de la transición energética que necesita con urgencia nuestro país.



Fotografía: Agence France Presse.

Enlaces de interés

- Atlas de Justicia Ambiental (2023). México. Disponible en: <https://ejatlas.org/country/mexico>
- Beyond Nuclear (2019). *Climate change and why nuclear power can't fix it* [documento completo]. Disponible en: <https://beyondnuclearinternational.files.wordpress.com/2018/08/climate-change-and-why-nuclear-power-cant-fix-it.pdf>
- _____ (2021): Why nuclear power slows action on climate change. Disponible en: <https://beyondnuclearinternational.org/beyond-nuclear-talking/>
- Enerdata (2023). Total final energy consumption. Disponible en: <https://eneroutlook.enerdata.net/forecast-world-final-energy-consumption.html>
- European Environmental Bureau (EEB) (2020). Decoupling debunked. Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability. Disponible en: <https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>
- Global Witness (2022). "Decade of defiance. Ten years of reporting land and environmental activism worldwide." Disponible en: <https://www.globalwitness.org/en/campaigns/environmental-activists/decade-defiance/>
- Grancea, L., M. Mihalasky, M. Fairclough, J.R. Blaise, A. Boytsov, A. Hanly y R. Indigenous Action Network: hoodwinked in the hothouse. Resist the false solutions to climate change. Disponible en: <https://climatefalsesolutions.org/>
- Hickel, J. y Kallis, G. (2019). Is green growth possible? *New Political Economy*, 25(4): 469-486. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13563467.2019.1598964>

- International Energy Agency (IEA). (2020). The role of critical minerals in clean energy transitions. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/executive-summary>
- _____. (2020). Net zero by 2050. A roadmap for the global energy sector. Disponible en: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
- _____. (2023). Final consumption of energy by source. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption#abstract>
- IPCC (2018). Special report on the impacts of global warming of 1.5°C. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- _____. (2022). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability* [summary for policymakers]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SPM_version_report_LR.pdf
- Kumar, R. Gadelha, L., Santos, R. & Yoon, H. (2023). An overview of thorium as a prospective natural resource for future energy. *Front. Energy Res*, 11. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1132611>
- Nelson, A.T. (2016). Thorium: not a near-term commercial nuclear fuel. *Bulletin of the Atomic Scientists* 68(5): 33-44. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0096340212459125>
- Nuclear Information and Resource Service. (2021). Irradiated nuclear fuel: scale of danger to drinking water. Disponible en: <https://nirs.org/wp-content/uploads/2021/03/Water-Contamination-Potential-Irradiated-Nuclear-Fuel.pdf>
- OECD (2020). Uranium resources, production and demand 2020. Nuclear Energy Agency no. 7551. Organization for Economic Co-Operation and Development. Disponible en: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/7555_uranium_-_resources_production_and_demand_2020__web.pdf

- Oppenheimer quotes: the story behind 'Now I am become Death, the destroyer of worlds' | WIRED UK. Disponible en: <https://www.wired.co.uk/article/manhattan-project-robert-oppenheimer#:~:text=As%20he%20witnessed%20the%20first,but%20also%20the%20most%20misunderstood>
- Servicio Geológico Mexicano (2017). El uranio en México. Disponible en: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/El-uranio-en-Mexico.html
- Smil, V. (2016). Nuclear electricity: a successful failure. Spectrum IEEE.org. Disponible en: <https://vaclavsmil.com/wp-content/uploads/2010/02/22.NUCLEAR-1.pdf>
- Weber, J. (2021). Fact check: is nuclear energy good for the climate? Disponible en: <https://www.dw.com/en/fact-check-is-nuclear-energy-good-for-the-climate/a-59853315>



Listado de figuras

FIGURA 1. Países productores de uranio | 10

FIGURA 2. Producción de uranio por país y requerimientos mundiales | 11

FIGURA 3. Generación de energía eléctrica por tecnología en México durante 2023 | 26



Fotografía: Pública, agencia de periodismo investigativo.

Referencias bibliográficas

- Agua (s.f.). Visión general del agua en México. *Agua.Org.Mx*. Disponible en: <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>
- Al Jazeera (2023). What are depleted uranium munitions and why is the US sending them to Ukraine? *Al Jazeera*. Disponible en: <https://www.aljazeera.com/news/2023/9/7/what-are-depleted-uranium-munitions-and-why-is-us-sending-them-to-ukraine>
- Beyond Nuclear (2018). *Small modular reactors and why we don't need them*. Disponible en: https://static1.1.sqspcdn.com/static/f/356082/28075316/1549476979127/Footnoted_BN_SMR_FactSheet_Feb+52019.pdf?token=szlknw5%2Fa7dGJm5h2EObLPuHN0I%3D
- _____ (2019a). *What women need to know about nuclear power*. Disponible en: https://static1.1.sqspcdn.com/static/f/356082/28132872/1558624946547/Women+and+nuclear+power_Single+side+.pdf?token=m9PG%-2BAmb9w08p4mOfkJfEqwMz2g%3D
- _____ (2019b). *Climate change and why nuclear power can't fix it* [resumen]. Disponible en: <https://static1.1.sqspcdn.com/static/f/356082/28075940/1549559985747/Climate+Change+Congress+Cheat+Sheet.pdf?token=53OkAOXT9jY07IZGtIGE1tg5BRs%3D>
- _____ (2024). *Yucca Mountain*. Disponible en: <https://beyondnuclear.org/radioactive-waste/yucca-mountain/>
- BP (2022). *Statistical Review of World Energy 2022*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

- Breña, F. y Breña, J.A. (2007). Disponibilidad de agua en el futuro de México. *Ciencia-Agua*, 58(3): 64-71. Disponible en: <https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/index.php/ediciones-anteriores/77-vol-58-num-3-julio-septiembre-2007/agua/123-disponibilidad-de-agua-en-el-futuro-de-mexico#:~:text=M%C3%A1s%20de%2035%20millones%20de,M%C3%A9xico%20se%20ve%20seriamente%20amenazado>
- Climate False Solutions (2021). *Hoodwinked in the hothouse*. Disponible en: https://climatefalsesolutions.org/wp-content/uploads/HOODWINKED_ThirdEdition_On-Screen_version.pdf
- Edwards, G. (s.f.). *Thorium and nuclear weapons*. Disponible en: <https://static1.1.sqspcdn.com/static/f/356082/23136555/1374164138620/Thorium+and+Nuclear+Weapons.pdf?token=szlkwn5%2Fa7dGJm5h2EObLPuHN0I%3D>
- EIA (Energy Information Administration) (2021). Electric Power Monthly. *U.S. Energy Information Administration*. https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_6_07_b
- Ferrari, L. (2024). Lo que debería cambiar en la política energética del país. *Revista Serendipia*. Disponible en: <https://shorturl.at/gBPW9>
- Ferrari, L., Masera, O., Ávila, S. y Flores Hernández, R. (2024a), Límites de las fuentes renovables. En: Ferrari, L., Masera, O. y Straffon, A. (Coords.). *Transición energética justa y sustentable. Contexto y estrategias para México*. México: Conahcyt-FCE.
- Ferrari, L., Masera, O y Straffon, A. (Coords.) (2024b). *Transición energética justa y sustentable. Contexto y estrategias para México*. México: Conahcyt-Fondo de Cultura Económica.
- Godoy, E. (2020). Alerta Roja en la central de Laguna Verde. *El País*. Disponible en: <https://elpais.com/mexico/2021-11-06/un-nuevo-apagon-vuelve-a-poner-la-mira-en-la-central-nuclear-de-laguna-verde.html>
- ____ (2021). La central de Laguna Verde registró una situación de riesgo en septiembre. *El País*. Disponible en: <https://elpais.com/mexico/2020-12-29/la-central-nuclear-de-laguna-verde-registro-una-situacion-de-riesgo-en-septiembre.html>
- Grancea, L., Mihalasky, M., Fairclough, M., Blaise, J. R., Boytsov, A., Hanly, A., López, L., Marlatt, J., Schneider, G. y Vance, R. (2020). Uranium resources, production and demand 2020 (No. NEA--7551). Organization for Economic Co-Operation and Development.

- Hickel, J.(2022). *Less is more. How degrowth will save the world*. Londres: Penguin.
- IEA (International Energy Agency) (2022). *Electricity*. Disponible en: <https://www.iea.org/energy-system/electricity>
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) (2014). *AR5 climate change 2014: mitigation of climate change*. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- Little, A. (2023). Small nuclear modular reactors. Disponible en: <https://www.adlittle.com/be-en/insights/prism/small-modular-reactors#:~:text=Small%20reactors%20date%20back%20to,in%20submarines%20and%20aircraft%20carriers>
- Maad, A. (2023). How dependent is France on Niger's uranium? *Le Monde*. Disponible en: https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/08/04/how-dependent-is-france-on-niger-s-uranium_6080772_8.html
- Martín del Campo, C. y François, J.L. (2006). *Perspectiva actual de la energía nuclear en México*. Simposio Anual de la Sección Latinoamericana de la Sociedad Nuclear Americana. Disponible en: <https://las-ans.org.br/wp-content/uploads/2019/04/12-MartindelCampo1.pdf>
- Millward-Hopkins, J., Steinberg, J.K., Rao, N.D. y Oswald, Y. (2020). Providing decent living with minimum energy: a global scenario. *Global Environmental Change* 65. Disponible en: <http://tankona.free.fr/millward-hopkins20.pdf>
- Morton, A. (2023) Small modular nuclear reactor that was hailed by Coalition as future cancelled due to rising costs. *The Guardian*. Disponible en: <https://www.theguardian.com/australia-news/2023/nov/09/small-modular-nuclear-reactor-that-was-hailed-by-coalition-as-future-cancelled-due-to-rising-costs>
- NFFF (Nuclear Free Future Foundation), RLS (Rosa Luxemburg Stiftung), BN (Beyond Nuclear) y IPPNW (International Physicians for the Prevention of Nuclear War) (2020). *Uranium Atlas. Facts and data about the raw material of the atomic age*. Disponible en: https://beyondnuclearinternational.files.wordpress.com/2020/09/uraniumatlas_2020.pdf
- OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) (2020). What are small modular reactors? *International Atomic Energy Agency*. Disponible en: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

- Planeas (Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad). Capacidad y generación. *Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad*. Disponible en: <https://energia.conacyt.mx/planeas/electricidad/generacion>
- Romero, A. (2023). El inevitable ascenso de la energía atómica. *La Jornada*. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/noticia/2023/12/01/opinion/el-inevitable-ascenso-de-la-energia-atmica-8063>
- Schlissel, D. (2022). Small Modular Reactor update: The fading promise of low-cost power from UAMPS' SMR. *Institute for Energy Economics and Financial Analysis*. Disponible en: <https://ieefa.org/resources/small-modular-reactor-update-fading-promise-low-cost-power-uamps-smr>
- Schneider, M. (Coord) (2023). *The World Nuclear Industry Status Report*. Disponible en: <https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2020-.html>
- Sener (Secretaría de Energía) (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Prodesen) 2023-2027. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>
- SGR (Scientists for global responsibility). (2023). Nuclear power and net zero: Too little, too late, too expensive. *Responsible Science journal no. 6*. Disponible en: <https://www.sgr.org.uk/resources/nuclear-power-and-net-zero-too-little-too-late-too-expensive>
- Tokar, B. (2023). Nuclear Fusion. Don't believe the hype! *Resilience*. Disponible en: <https://www.resilience.org/stories/2023-01-03/nuclear-fusion-dont-believe-the-hype/>
- UKNNL (United Kingdom National Nuclear Laboratory) (2010). *Position of Thorium Reactors*. Disponible en: https://www.nnl.co.uk/wp-content/uploads/2019/01/nnl__1314092891_thorium_cycle_position_paper.pdf
- WEF (World Economic Forum) (2022). Nuclear fuel suffers from a geographical supply imbalance. Here's why that's a concern. *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2022/02/nuclear-energy-fuel-supply-crunch/>

- WNA (World Nuclear Association) (2020). Thorium. Resource Library. *World-Nuclear*. Disponible en: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>
- _____ (2023). World Uranium Mining Production. *World-Nuclear*. Disponible en: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>
- _____ (s.f.a). Nuclear Fuel Cycle. *World-Nuclear*. Disponible en: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle.aspx>
- _____ (s.f.b). Uranium Resources. *World-Nuclear*. Disponible en: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources.aspx>

Programa
Nacional
Estratégico



ENERGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS