



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

PREFACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE UN PEQUEÑO REACTOR MODULAR PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UN CAMPO PETROLERO

Presentado para obtener el título de:

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Alison Yanith Pérez Forero

Hermes Orlando Llanes Rincón

Dirección:

David Andrés Galeano Gonzalez

Co-dirección:

Ángela Patricia Pardo González

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

2025

DEDICATORIA

Dedicado a nuestro hijo Joaquín porque, sin saberlo aún, es la fuente de inspiración constante y fluida para elaborar este documento.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al profesor David Galeano, quien es una autoridad internacional en temas nucleares y nos apoyó desde el inicio, con el único interés de que se derriben mitos y se conozca en el país sobre el tema nuclear. Su tenacidad, multiplicidad de actividades, sendos artículos en revistas científicas y académicas y su buen humor, siempre hacen parecer la tarea fácil y nos indica la senda a recorrer.

A la profesora Ángela Pardo, por su paciencia, gran pedagogía para corregir y su forma de explicar tan metódica, ha sido una luz en este camino recorrido.

RESUMEN

Se realizó un estudio de prefactibilidad para la implementación de un pequeño reactor modular (SMR) por sus siglas en inglés, para generación continua, limpia y de alta disponibilidad de energía eléctrica en las operaciones de producción de un campo petrolero, donde la mitad de su energía proviene de combustibles fósiles, con el objetivo de descarbonizar la matriz energética y lograr la reducción de emisiones de CO₂. El estudio incluyó:

- Revisión de la regulación nuclear existente en el país e identificación de los requerimientos de regulación y normativas requeridas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- Desarrollo de un estudio de prefactibilidad que evalúe la implementación del SMR con la infraestructura existente del campo petrolero, revisando la compatibilidad técnica y la posibilidad de reemplazar una fuente de energía fósil por otra con menores emisiones de CO₂.
- Demostrar que el reactor tiene una operación segura en las condiciones reales del campo petrolero y ante diferentes modos de falla se garantice un apagado rápido y seguro del reactor.

En los resultados se muestra que el reactor seleccionado es el módulo VOYGR® de Nuscale, de 77 MWe, considerando los 6 parámetros de la NEA/OCDE y la sustitución de combustible fósil del campo petrolero, como los casos planteados en la industria petrolera de Canadá. En este caso, se estimó una reducción de emisiones de 194 mil TON CO₂e/año, con beneficios económicos anuales estimados en MUSD\$62,6, que apalancan la inversión con un tiempo de recuperación menor a 5 años, lo que confirma los beneficios de la tecnología vistos en el marco teórico.

Para sustentar la estimación del tiempo de recuperación inferior a cinco años, se realizó un análisis de sensibilidad considerando variaciones en el precio del MWh (entre 52 y 120 USD/MWh), tasa de descuento (5%-10%) y factores de planta (85%-95%). Bajo el escenario base (LCOE de 65 USD/MWh, tasa de descuento del 7% y factor de planta del 93%), el retorno de la inversión es de 4.7 años. En un escenario adverso (precio bajo y 85% de disponibilidad), el tiempo de retorno se extiende a 7.2 años. Esto confirma que, incluso en condiciones conservadoras, la inversión es financieramente atractiva para sustitución de generación fósil en campos petroleros.

Todo lo anterior permitió concluir que la respuesta del reactor ante eventos transitorios en un campo petrolero presenta un apagado rápido y seguro, brindando una energía continua y de bajas emisiones sin tener variabilidad en los precios de energía eléctrica, ni en la continuidad del servicio por fenómenos climáticos como el del Niño. Esto permitiría configurar una matriz eléctrica diversificada y resiliente ante desafíos climáticos y de suministro de combustibles fósiles.

ABSTRACT

A pre-feasibility study was carried out for the implementation of a small modular reactor (SMR) for continuous, clean and highly available generation of electricity in the production operations of an oil field, where half of its energy comes from fossil fuels, with the aim of decarbonizing the energy matrix and reducing CO₂ emissions. The study included:

- Review of the country's existing nuclear regulations and identification of the regulatory requirements and standards required by the International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Development of a pre-feasibility study that evaluates the implementation of the SMR with the existing oil field infrastructure, reviewing the technical compatibility and the possibility of replacing one fossil energy source with another with lower CO₂ emissions.
- Demonstrate that the reactor has a safe operation in the real conditions of the oil field and in case of different failure modes a fast and safe shutdown of the reactor is guaranteed.

The results show that the selected reactor is the VOYGR® module of Nuscale, of 77 MWe, considering the 6 parameters of the NEA/OECD and the substitution of fossil fuel of the oil field, as the cases raised in the Canadian oil industry. In this case, an emission reduction of 194 thousand TON CO₂e/year was estimated, with annual economic benefits estimated at MUSD\$62.6, which leverages the investment with a payback time of less than 5 years, confirming the benefits of the technology seen in the theoretical framework.

To support the estimated payback time of less than five years, a sensitivity analysis was performed considering variations in the MWh price (between 52 and 120 USD/MWh), discount rate (5%-10%) and plant factors (85%-95%). Under the base scenario (LCOE of 65 USD/MWh, discount rate of 7% and plant factor of 93%), the return on investment is 4.7 years. Under an adverse scenario (low price and 85% availability), the payback time extends to 7.2 years. This confirms that, even under conservative conditions, the investment is financially attractive for replacing fossil generation in oil fields.

All the above allowed concluding that the response of the reactor to transitory events in an oil field presents a fast and safe shutdown, providing continuous and low-emission energy without having variability in the prices of electric energy, nor in the continuity of service due to climatic

phenomena such as El Niño. This would make it possible to configure a diversified and resilient electricity matrix in the face of climate and fossil fuel supply challenges.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 2 OBJETIVOS.....	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos.....	13
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	14
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	17
4.1 Definición de SMR.....	19
4.2 Clasificación de los SMR.....	21
4.3 SMR de Neutrones Rápidos “Fast Neutron SMR o FR”	22
4.4 Micro Reactores Modulares (MMR).....	25
4.5 Reactor de sales fundidas (Molten Salt Reactor o MSR).....	27
4.6 Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas (HTGR)	29
4.7 Reactores Refrigerados por Agua (WCR).....	31
4.8 Gestión de residuos radiactivos.....	34
4.9 Ciclo de vida de los SMR.....	36
4.10 Estado del arte en generaciones de reactores	37
4.11 Estado del arte en operación de reactores	38
4.12 Estado del arte en costos	39
4.13 Estado del arte en extracción de crudo con energía nuclear	41
Capítulo 5 METODOLOGÍA.....	43
5.1 Revisión del estado del arte a julio de 2024 en SMR.....	43
5.2 Revisión de la regulación nuclear en Colombia.....	43
5.3 Identificación de requerimientos de regulación y normativas del OIEA	43
5.4 Estudio de prefactibilidad técnica y económica.....	44
5.5 Análisis de Integración de Sistemas para la Implementación de SMR.....	44
Capítulo 6 RESULTADOS	45
6.1 Marco normativo de regulación nuclear vigente en el país y requisitos y estándares establecidos por el OIEA.....	45
6.1.1 Seguridad tecnológica	49
6.1.2 Seguridad física	50
6.1.3 Salvaguardias	50
6.1.4 Responsabilidad civil por daños nucleares.....	50
6.2 Estudio de prefactibilidad técnica y económica para la implementación de un reactor modular pequeño (SMR) en un campo de producción de petróleo.....	53
6.2.1 Valoración de la tecnología nuclear	53
6.2.2 Reactor seleccionado.....	55
6.2.3 Inversión inicial módulo.....	57
6.2.4 Compromisos mundiales de descarbonización a través de energía nuclear	60
6.3 Comportamiento de la potencia del reactor ante eventos transitorios.....	62

Capítulo 7 Conclusiones.....	ix
REFERENCIAS	75
	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potenciales beneficios de los SMR.	20
Tabla 2. Costos CAPEX por MW de las centrales que entran en operación.	39
Tabla 3. Características reactor Nuscale seleccionado.....	56
Tabla 4. Comparativo económico Diesel y SMR.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Generación de energía eléctrica por fuente 1990-2022	4
Figura 2. Proyección de generación de energía eléctrica a 2030	5
Figura 3. Tasa de fallecimientos y emisiones de CO ₂ por fuentes de energía.	6
Figura 4. Precio de oferta de generación con combustible, mezcla y precio de bolsa	7
Figura 5. Capacidad instalada en cada escenario (MW)	9
Figura 6. Factor de capacidad por fuente de energía, 2023.....	10
Figura 7. Costo nivelado de energía proyectado de generación de energía	12
Figura 8. Comparativo uso de suelo diferentes fuentes energéticas	14
Figura 9. Esquema sistema de generación de energía campo de producción	15
Figura 10. Curva de carga diaria campo de producción. Fuente: elaboración propia.	16
Figura 11. Fisión nuclear.....	17
Figura 12. Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector	18
Figura 13. Flujograma básico para hojas de ruta tecnología SMR.	21
Figura 14. Habilitando condiciones para entrada al mercado de SMR.	22
Figura 15. SMR de neutrones rápidos “Fast Neutron SMR o FR”	24
Figura 16. Micro Reactores Modulares (MMR) refrigerado por gas	26
Figura 17. Reactor de sales fundidas (MSR).....	28
Figura 18. Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas (HTGR).....	30
Figura 19. Reactores de Agua Presurizada (PWR).	32
Figura 20. Reactores de Agua en Ebullición (BWR).	33
Figura 21. Actividades involucradas en la gestión de residuos radiactivos	35
Figura 22. Ciclo de vida de los SMR	36
Figura 23. Generaciones de reactores nucleares	37
Figura 24. Proyección IEA despliegue reactores nucleares hasta 2050	39
Figura 25. Características reactor I-SMR de Corea del Sur	41
Figura 26. Componentes del derecho nuclear. Fuente: OIEA.....	49
Figura 27. Elementos de legislación nuclear nacional integral	52
Figura 28. Marco Gubernamental del regulador	52
Figura 29. Comparativo de reactores con mayor madurez tecnológica	55
Figura 30. Partes principales del módulo Nuscale.	57
Figura 31. Estimación inversión SMR 77 MWe	58
Figura 32. Países en fase de incorporar programa nuclear.....	61
Figura 33. Potencia reactor - disminución de la temperatura del agua de alimentación.....	63
Figura 34. Potencia reactor - aumento del flujo de agua de alimentación	64
Figura 35. Potencia reactor - aumento del flujo de vapor	65
Figura 36. Potencia reactor - Falla tubería de vapor limitando la presión del sistema de enfriamiento	66
Figura 37. Potencia reactor - Falla tubería de vapor limitando la relación mínima de flujo de calor crítico (MCHFR)	67
Figura 38. Potencia reactor - inundación de la vasija de contención	68
Figura 39. Potencia reactor - Presión pico del RCS, por (LOEL, TT y LOCV).....	70
Figura 40. Potencia reactor - Presión pico del sistema de RCS, por cierre de MSIV	71

Figura 41. Potencia reactor - Presión pico del sistema de RCS, por pérdida de potencia AC	72
Figura 42. Potencia reactor - Presión pico del sistema de RCS, por pérdida de agua de alimentación	73
Figura 43. Potencia reactor - Presión pico del sistema de RCS, por aumento del inventario de refrigerante	74

GLOSARIO

CES: (Containment Evacuation System). Sistema de evacuación de la contención [1].

CHF: (Critical Heat Flux). En reactores refrigerados por agua, el flujo de calor a través de la vaina de la varilla de combustible que separa la ebullición nucleada de la ebullición de transición del líquido refrigerante. Cuando el vapor generado envuelve las varillas de combustible, se puede reducir la extracción de calor, dado que el flujo en los ensambles de combustibles supera el flujo crítico [2].

CNV: (Containment Vessel). Vasija de contención [1].

CRDS: (Control Rod Drive System). Sistema de accionamiento de la barra de control [1].

DHRS: (Decay Heat Removal System). Sistema de eliminación del calor de decaimiento [1].

Economía neutrónica: En un reactor nuclear y para un elemento de volumen, balance entre producción de neutrones, por fisión u otros procesos, y su desaparición por absorción o por fugas [3].

Flujo de neutrones o flujo neutrónico: Magnitud utilizada en el estudio de las interacciones de los neutrones con los átomos de un medio material en un punto determinado del espacio, que se calcula mediante el producto de la densidad neutrónica por el módulo de la velocidad de los neutrones. Su ecuación dimensional es $L^{-2}T^{-1}$. Se suele medir en neutrones por cm^2 y por segundo [4].

Se refiere a la densidad y la distribución espacial de los neutrones en el núcleo del reactor [5].

FR: (Fast Neutron Reactor). Reactor de Neutrones Rápidos [6].

IEA: (International Energy Agency). Agencia Internacional de Energía [7].

LCOE: (Levelized Cost of Energy). El Costo Nivelado de Energía es la medida del promedio neto del costo actual de la generación de energía de un generador durante toda su vida útil (incluye construcción y operación). Se usa para la planificación de inversiones y para comparar diferentes métodos de generación de electricidad en una forma consistente [8].

LOCV: (Loss of Condenser Vacuum). Pérdida de vacío del condensador [1].

LOEL: (Loss of External Load). Pérdida de carga externa [1].

LUIE: (Land Use Intensity of Electricity:). Intensidad de uso del suelo de la energía eléctrica medida en $ha/TWh/año$ [9].

MSIV: (Main Steam Isolation Valve). Válvula de aislamiento de vapor principal [1].

MSR: (Molten Salt Reactor). Reactor de Sales Fundidas [10].

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica [11].

PZR: Presurizador [1].

RCCWS: (Reactor Component Cooling Water System). Sistema de agua de refrigeración de los componentes del reactor [1].

RCS: (Reactor Coolant System). Sistema de refrigeración del reactor [1].

RPV: (Reactor Pressure Vessel). Presión de la vasija del reactor [1].

RSV: (Reactor Safety Valve). Válvula de seguridad del reactor que proporcionan protección contra sobrepresión del módulo de potencia [1].

SAGD (Steam-Assisted Gravity Drainage). El drenaje por gravedad asistido por vapor (por sus siglas en inglés) es una técnica de perforación utilizada para extraer crudo pesado que se encuentra enterrado a demasiada profundidad o cuyo acceso resulta complicado por otros motivos. Su ubicación hace que sea económicamente ineficaz extraerlo con los métodos tradicionales [12].

SG: (Steam Generator). Generador de vapor [1].

SMR: (Small Modular Reactor). Reactor modular pequeño. Son reactores nucleares avanzados con una capacidad de potencia de hasta 300 MW(e) por unidad, lo que representa cerca de un tercio de la capacidad de generación de los reactores nucleares de potencia tradicionales. Los SMR, que pueden producir grandes cantidades de energía eléctrica con bajas emisiones de carbono [13].

SSI: (Secondary System Isolation). Sistema de aislamiento secundario [1].

STR: (Sistema de transmisión regional). Está compuesto por redes regionales o interregionales de transmisión de energía eléctrica, con líneas y subestaciones que operan a tensiones menores de 220 kV y que no pertenecen a un sistema de distribución local [14].

TRISO: (Combustible Cerámico Tri-Isotrópico). Compuesto por carbono, oxígeno y uranio recubiertos por tres capas de materiales a base de cerámica y carbono que impiden la emisión de productos de fisión radiactivos. A estas partículas se les puede dar forma de esferas del tamaño de pastillas cilíndricas o una bola de billar. El combustible TRISO-UPEAC (Uranio Poco Enriquecido de Alta Concentración) se utiliza en reactores de alta temperatura refrigerados por gas, y algunos proveedores tienen previsto utilizar combustible TRISO-UPEAC para sus diseños de SMR y de microreactores [15].

TT: (Turbine Trip). Disparo de turbina [1].

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Desde la primera revolución industrial a mediados del siglo XVIII y hasta la fecha, la industria ha tenido grandes avances y desarrollos tecnológicos para lograr mayores volúmenes de producción [16]. La industria extractiva, tanto de minerales como de petróleo, no ha sido ajena a estos desarrollos; por ejemplo, se ha logrado extraer crudo a menores costos y se han superado varios paradigmas asociados a la escasez del recurso para darle continuidad al abastecimiento global de combustibles fósiles.

Los pequeños reactores modulares (SMR, siglas en ingles), al ser una tecnología emergente, presentan retos específicos en comparación con los reactores nucleares a gran escala. Entre estos desafíos se encuentran la gestión del ciclo del combustible y el desarrollo de métodos efectivos de gestión térmica a nivel modular, especialmente en reactores de sales fundidas (MSR, siglas en ingles) y reactores de neutrones rápidos (FR, siglas en ingles). La transferencia de calor y la eficiencia en la fisión se deben maximizar para asegurar una producción energética confiable y competitiva con relación a sistemas convencionales [17]. Esto requiere la integración de aleaciones avanzadas y sistemas de monitoreo en tiempo real de los parámetros críticos de operación del reactor.

Los avances en la tecnología de reactores nucleares, particularmente en los SMR, han permitido no solo soportar la carga base sino ser una fuente de energía eléctrica libre de carbono y suministrar otros productos obtenidos a través de cogeneración necesarios para descarbonizar sectores tales como transporte, construcción, aplicaciones industriales de calor y desalinización de agua [17]. Los SMR adoptan funciones de seguridad avanzadas y tienen una operatividad mejorada para permitir un funcionamiento flexible con energías renovables variables, tales como solar y eólica [17].

Los SMR tienen una capacidad media entre 10 MW y 300 MW [13], sus componentes son producidos en fabrica y luego transportados en módulos, lo que apunta a mejores economías en la producción en serie y tiempos de instalación y construcción más cortos, lo que los hace atractivos para industrias y países que no tienen experiencia en la operación de plantas nucleares o que tienen un tamaño de red pequeño.

La adopción de SMR en sectores industriales complejos, como los campos petroleros, requiere una comprensión profunda de la interacción entre los módulos de generación nuclear y la infraestructura de la red existente. Esto implica no solo una adaptación de los sistemas de distribución eléctrica, sino también una implementación de protocolos avanzados de respuesta a variaciones de carga [18]. Los SMR, en particular, aquellos refrigerados por helio o con moderadores de grafito, ofrecen una estabilidad termodinámica excepcional, permitiendo una integración eficiente con fuentes intermitentes. La baja reactividad en vacío y los límites térmicos más elevados proporcionan un margen operativo adicional, lo que aumenta significativamente la capacidad de respuesta frente a variaciones en la demanda energética, que fabricantes de reactores como Westinghouse indican que el reactor puede operar con variaciones de hasta el 20% de la carga en un minuto [19].

Fabricantes de reactores como Nuscale [19], indican que su módulo tiene la capacidad de variar la potencia del reactor hasta un 40% por hora, lo que se ajusta a las especificaciones establecidas por el Electric Power Research Institute (EPRI, siglas en inglés), en el documento: *“Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Revision 13, Tier 2, Chapter 1”* [20]. Para responder aún más rápidamente a los cambios súbitos de la demanda de energía, el módulo de Nuscale puede reducir rápidamente su producción de energía eléctrica hasta un 10% por minuto y volver a plena potencia a la misma velocidad utilizando el bypass de turbina, haciéndolo mucho más rápido que los reactores nucleares convencionales [18].

Sin embargo, estas capacidades de maniobrabilidad deben ser entendidas en el contexto del diseño termohidráulico del SMR. El uso del bypass de turbina permite una rápida desviación del vapor generado, evitando su paso por la turbina, lo cual modifica la carga sin alterar la potencia térmica del reactor de manera inmediata [21]. Este comportamiento está acoplado al sistema de control de barras y al control automático del flujo de refrigerante, los cuales deben ser diseñados para evitar oscilaciones termohidráulicas o estrés térmico en componentes críticos. Además, la respuesta transitoria debe validarse bajo criterios como la relación mínima de flujo de calor crítico (MCHFRC) que es un parámetro para evaluar la seguridad de un reactor nuclear y el margen de estabilidad nucleónica, particularmente en escenarios donde la potencia decrece rápidamente y luego retorna a plena carga [22].

Hay un tratado internacional que trata del cambio climático, admitido por 196 Países que entró en vigor el 4 de noviembre de 2016 a pesar de ser acordado en la COP21 el 12 de diciembre de 2015 en París, llamado el Acuerdo de París 2015. Entre sus objetivos está establecer un límite de calentamiento mundial inferior a 2°C, e incluso menor a 1.5°C, que se espera lograr en el 2050 [23].

Como se observa, adicional a la reducción de emisiones de CO₂, otro de los objetivos del Acuerdo de París de 2015 es la disminución del aumento de temperatura, esto es un indicio de que el planeta ha superado su capacidad de asimilación [24] dado que no se ha frenado el incremento de la temperatura del planeta, por lo que se deben acelerar las acciones para descarbonizar la industria a través de tecnologías limpias, seguras, estables y económicas, para complementar el aporte de energías renovables provenientes de fuentes solares y eólicas.

La implementación de SMR en redes energéticas diversificadas con un alto componente de fuentes renovables intermitentes, como la solar y la eólica, requiere considerar la capacidad de los SMR para operar en modo de carga base y de seguimiento de carga [17]. Los diseños de SMR actuales incluyen mecanismos avanzados de seguridad pasiva y redundancia que les permiten ajustar su producción energética para estabilizar redes con altos niveles de penetración de energía renovable. Esto se logra mediante el uso de tecnologías de control de reactividad y almacenamiento térmico integrado, lo que permite que los SMR sirvan como una reserva estratégica que se adapta dinámicamente a la disponibilidad de las fuentes renovables en tiempo real.

Por otro lado, la Agencia Internacional de Energía (IEA, siglas en inglés), a través de la herramienta “Energy Statistics Data Browser” [25], permite ver gráficamente el consumo de energía a nivel global suministrado por diferentes fuentes en los últimos treinta años, tal como se muestra en la figura 1 [25]. En esta, se puede ver que la industria nuclear ha suministrado aproximadamente el 10.5% de energía consumida a nivel global, proporcionando seguridad energética y estabilidad en la red eléctrica. Además, entre todas las fuentes de energía, la nuclear es la única capaz de generar los principales portadores energéticos: electricidad, calor e hidrógeno. Asimismo, destaca por ser la única fuente que gestiona integralmente sus residuos, desde la extracción del material hasta su disposición final [17].

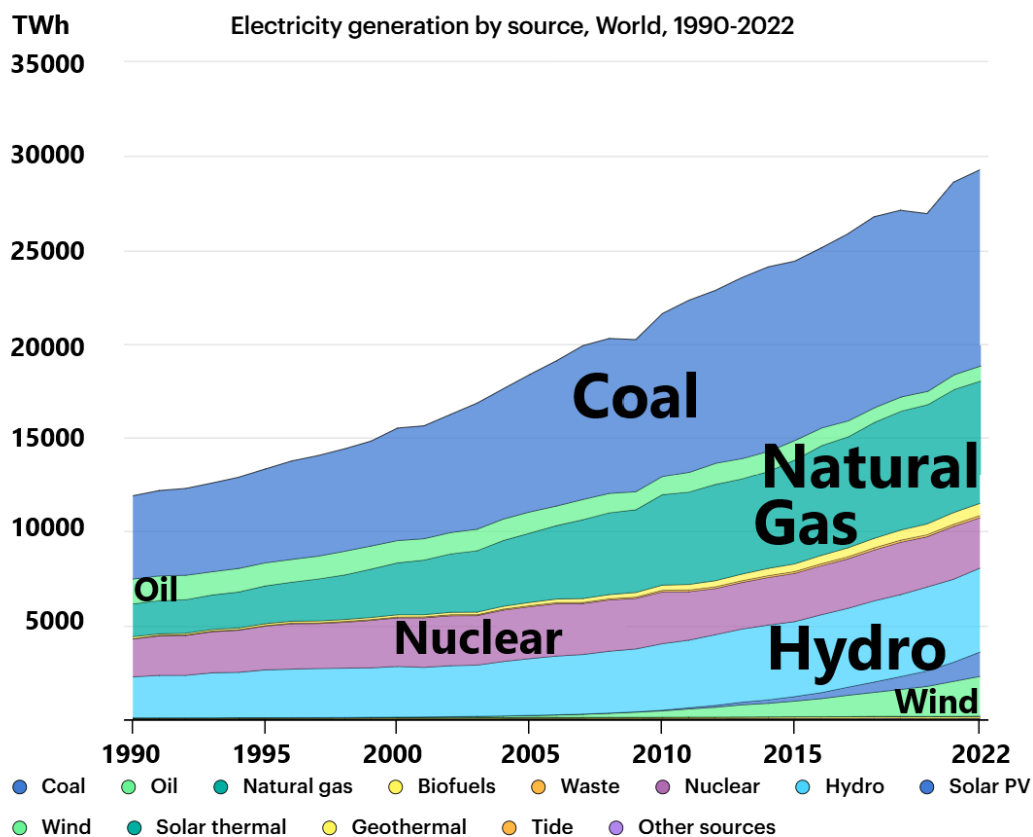


Figura 1. Generación de energía eléctrica por fuente 1990-2022

Fuente: Tomado de [25].

Para asegurar el confinamiento de residuos de alta actividad, se han desarrollado estrategias avanzadas como el encapsulamiento en matrices cerámicas y el almacenamiento en depósitos profundos. Estas tecnologías ofrecen una solución segura para la disposición de residuos a largo plazo, minimizando el impacto ambiental y el riesgo de exposición radiológica [17].

En la figura 2 [26] se muestra el porcentaje de participación de energía nuclear en diferentes regiones del mundo desde 1990 hasta el 2023. En regiones como Rusia, Asia, China, y Medio Oriente se puede identificar una tendencia al crecimiento con corte al 2030. Los países de estas regiones, han aumentado su capacidad nuclear con reactores de III y III+ generación; a su vez, son las economías que están impulsando el despliegue de los reactores de IV generación, los cuales se estima que inicien operación en el 2030 [27]. Cabe anotar que, en regiones como Norteamérica y Europa, se encuentra la mayor población de los primeros reactores (instalados en la década de los

cincuenta a los setenta) y a la fecha dicha flota se encuentra finalizando su vida útil, por lo que se puede observar la desincorporación o desmantelamiento de esas primeras centrales por cumplir su ciclo de vida [17].

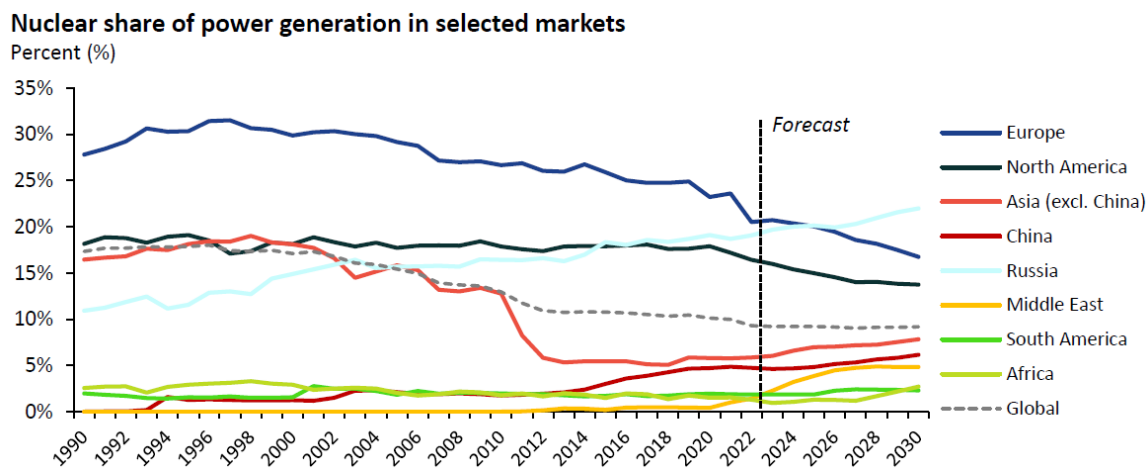


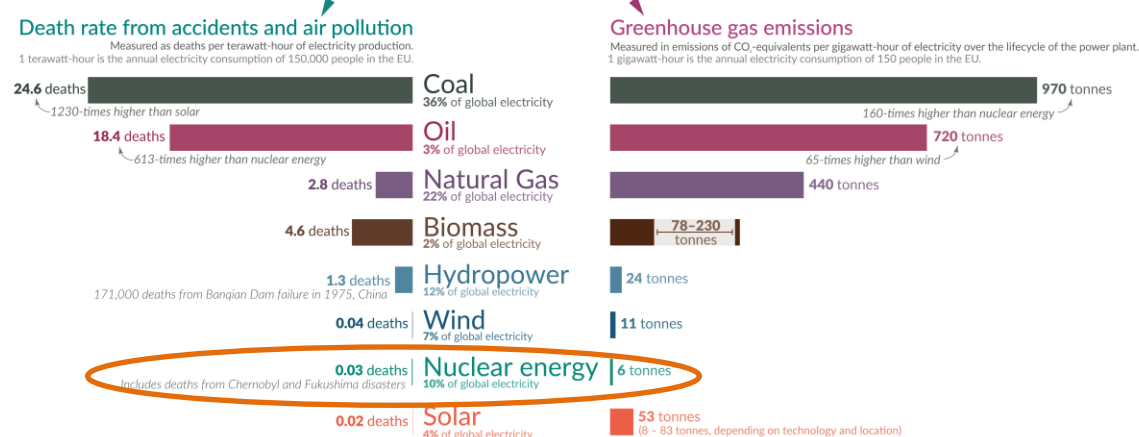
Figura 2. Proyección de generación de energía eléctrica a 2030

Fuente: Tomado de [26].

Por otro lado, la generación con combustibles fósiles tiene gran impacto en el medio ambiente, dadas las altas emisiones de CO₂ que quedan en el ambiente, afecta la calidad de vida de las personas que trabajan y viven cerca a estas centrales de generación.

H. Ritchie y M. Roser, en su artículo titulado: “*What are the safest and cleanest sources of energy*”, en el sitio web Our World in Data, marzo de 2024 [28], analizan y comparan las diferentes fuentes de energía en términos de seguridad, limpieza y sostenibilidad (figura 3). En esta gráfica, se puede observar que, dentro de las fuentes de energía eléctrica existentes, la energía nuclear ocupa el 2º lugar dentro de las más seguras y limpias seguida de la energía solar, de esta manera la energía nuclear podría contribuir significativamente a la reducción de emisiones de CO₂ y a la estabilidad del suministro energético.

What are the safest and cleanest sources of energy?



Death rates from fossil fuels and biomass are based on state-of-the-art plants with pollution controls in Europe, and are based on older models of the impacts of air pollution on health. This means these death rates are likely to be very conservative. For further discussion, see our article: [OurWorldinData.org/safest-sources-of-energy](https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy). Electricity shares are given for 2021. Data sources: Markandya & Wilkinson (2007); UNSCEAR (2008; 2018); Sovacool et al. (2016); IPCC AR5 (2014); UNECE (2022); Ember Energy (2021). OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems. Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Figura 3. Tasa de fallecimientos y emisiones de CO₂ por fuentes de energía.

Fuente: Tomado de [28].

Una forma de realizar un estudio económico, técnico y estratégico en el sector energético en Colombia es acceder a datos actualizados y confiables de los combustibles utilizados en la generación de energía eléctrica. La referencia, “*Precio de Oferta por combustible*”, disponible en el sitio web de XM [29], operador del Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia y administrador del Mercado de Energía Mayorista (MEM), nos brinda información detallada de los precios de oferta de los combustibles utilizados para la generación de energía eléctrica. La figura 4, muestra la gráfica del precio de oferta de generación de energía eléctrica con combustible y de bolsa en los últimos 5 años.

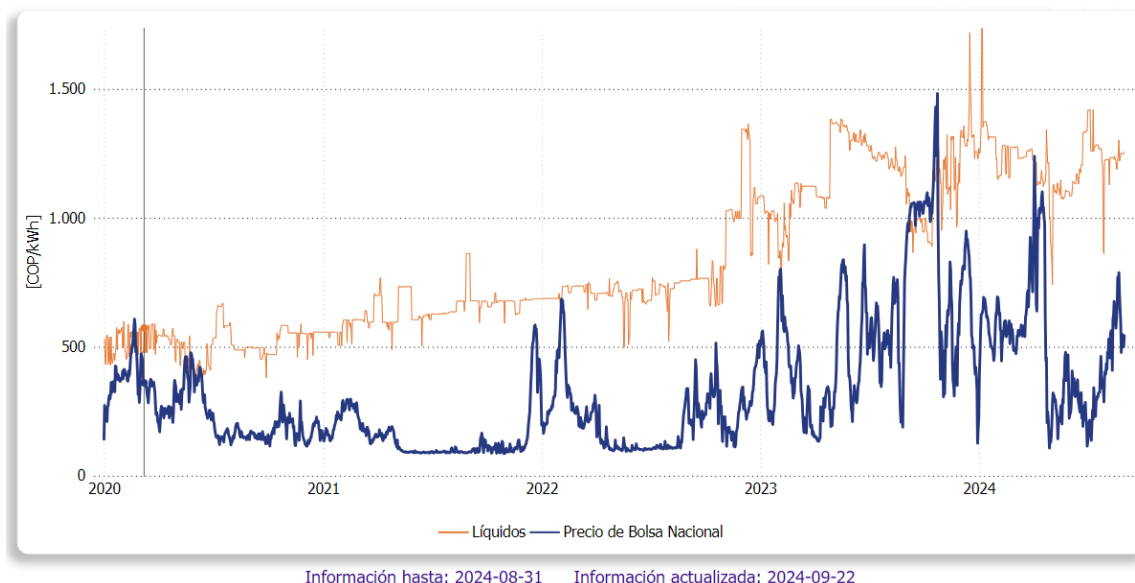


Figura 4. Precio de oferta de generación con combustible, mezcla y precio de bolsa

Fuente: Tomado de [29].

En esta, se puede evidenciar que el 2020 el costo de generar energía eléctrica con combustibles líquidos en Colombia fue de COP\$500/KWh y que en el 2022 llegó a su valor pico de COP\$1500/KWh, evidenciando costos muy superiores al precio de bolsa. Este incremento afecta la economía de una empresa generadora con combustibles líquidos, aumentando así los costos de producción y disminuyendo las posibilidades de inversiones futuras en términos de infraestructura. Reducir estos costos podría garantizar plazas laborales y la continuidad de la empresa en la región, y dados los avances en SMR, se estima que el costo nivelado de energía a través de SMR sea más bajo que con combustibles líquidos [29], lo que permitirá que la empresa continúe generando dinámica económica y desarrollo en la región.

La incorporación de SMR en sistemas energéticos representa un cambio paradigmático en la relación entre eficiencia energética y viabilidad económica, pues se tiene la concepción generalizada que la energía nuclear es cara. Sin embargo, gracias a su diseño modular y capacidad de producción en serie, los SMR pueden integrarse de manera escalable y rentable en zonas con infraestructura limitada, proporcionando una solución de alta disponibilidad para necesidades energéticas constantes.

Se prevé una reducción significativa en las emisiones de CO₂ al sustituir los combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica. Esto se evidencia en el comparativo de la figura 3, donde la energía nuclear, además de ser la 2ª fuente más segura, se destaca como la más limpia. Su implementación contribuye a la descarbonización de la matriz energética y tiene un impacto positivo en la calidad del aire y del medioambiente en las zonas donde actualmente operan centrales de generación que utilizan combustibles líquidos.

Lo anterior, se alinea con el Plan Energético Nacional (2022-2052) emitido por la UPME, ver figura 5 [30], que en todos los escenarios previstos: actualización, modernización inflexión, innovación y transición energética, considera:

En cuanto a otras fuentes no convencionales, se plantea la incorporación de energía nuclear con una capacidad estimada entre 1.200 MW y 1.800 MW, utilizando tecnología SMR (Reactores Modulares Pequeños) en bloques de 300 MW. Se propone iniciar la inclusión de esta tecnología a partir de 2035, lo que indica la necesidad de acelerar su entrada en la regulación en comparación con los escenarios anteriores, que plantean la energía nuclear a partir de 2038. Para ello, será necesario evaluar la pertinencia de una hoja de ruta indicativa para la inclusión de esta tecnología en el sistema y, para asegurar las condiciones mínimas de negociación con posibles proveedores [30, p. 130].

Los SMR destacan por su capacidad para construirse en plazos más cortos, ocupar menos espacio, operar con mayor seguridad y garantizar una alta disponibilidad de energía, ya que no dependen de factores estacionales como el fenómeno de El Niño. Esto les permite generar energía de manera constante durante todo el año, alcanzando un factor de planta que puede superar el 93% [31].

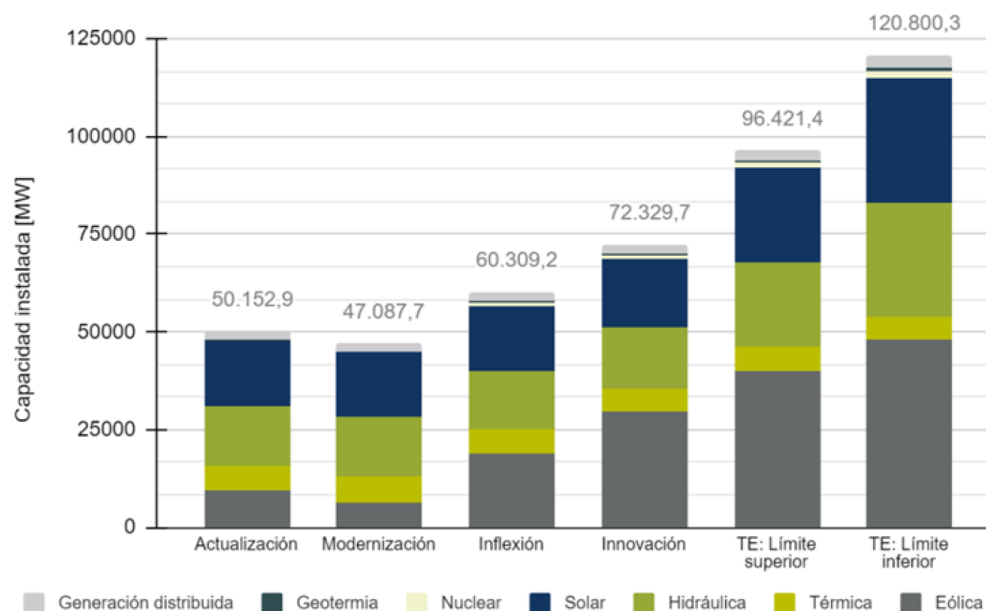


Figura 5. Capacidad instalada en cada escenario (MW)

Fuente: Tomado de [30].

En la figura 6 [31], publicada por el Departamento de Energía de Estados Unidos en 2023, se destaca que la energía nuclear posee el mayor factor de capacidad, superando el 93,1%. Esto implica que, de las 8760 horas que tiene un año, opera a plena carga durante más de 8155 horas. Su funcionamiento no está influenciado por condiciones climáticas ni estacionales, lo que le permite suministrar energía limpia y confiable al sistema eléctrico de Estados Unidos [31].

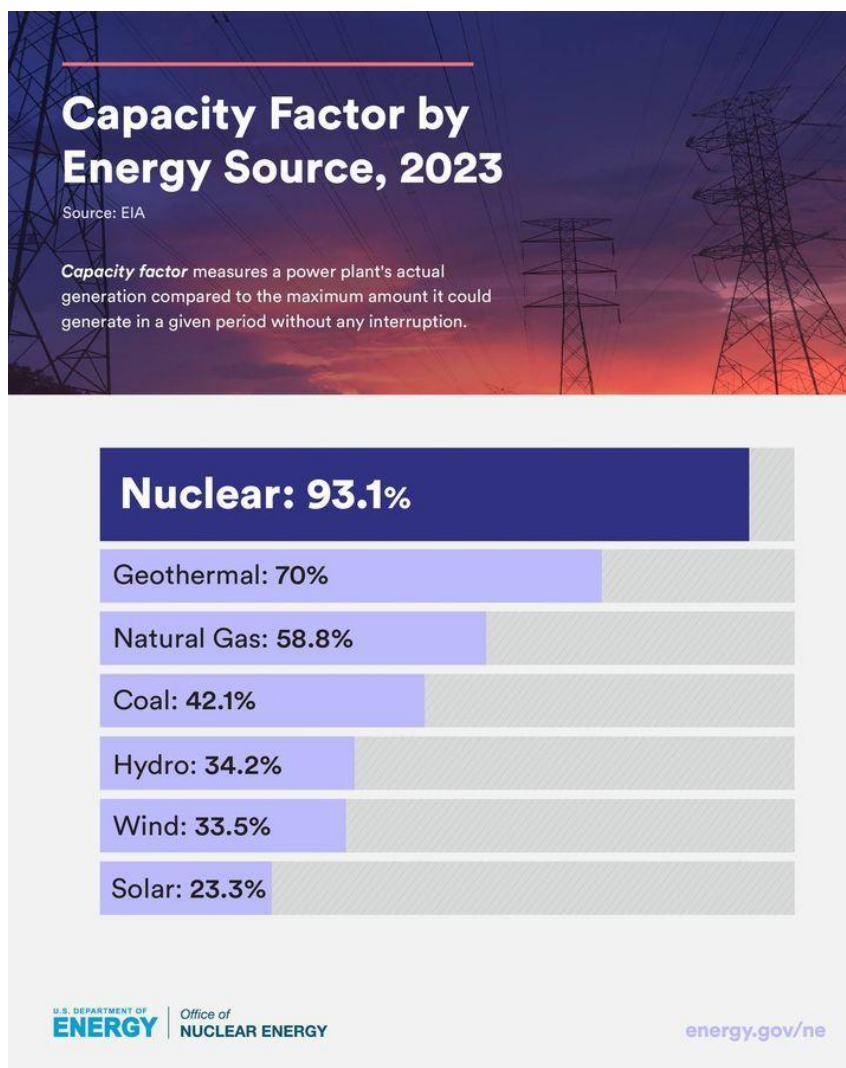


Figura 6. Factor de capacidad por fuente de energía, 2023

Fuente: Tomado de [31].

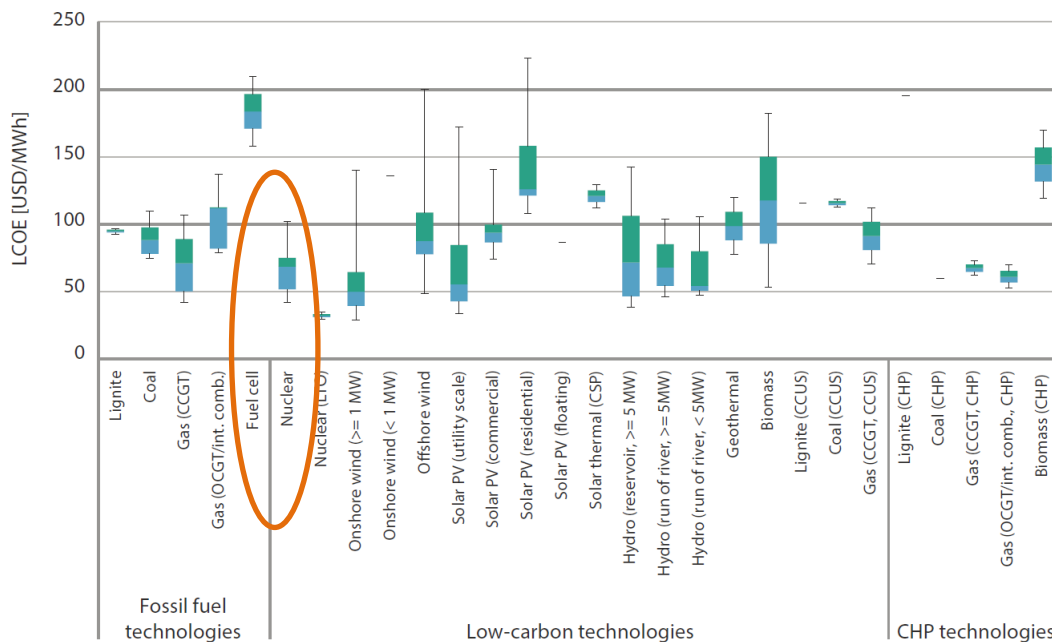
La independencia de los SMR de condiciones climáticas, como el fenómeno de El Niño, brinda una estabilidad energética única en su tipo. Este factor resulta esencial en áreas vulnerables a cambios estacionales extremos, asegurando una capacidad de carga constante y confiable durante todo el año.

Esta condición de continuidad del suministro de energía eléctrico, sumado a la disminución del costo nivelado de energía durante la vida útil de la central de generación, como se observa en la figura 7 [32], elaborada por la Agencia Internacional de Energía (IEA, siglas en inglés), y la NEA perteneciente a la OCDE, donde los costos de generación de energía nuclear se estiman entre

USD\$52/MWh y USD\$85/MWh, pueden apalancar un caso de negocio para proceder con la inversión; por lo tanto, si se compara el Costo Nivelado de Energía (LCOE, siglas en inglés), de la energía nuclear con el LCOE de las fuentes fósiles e inclusive con el LCOE de otras fuentes bajas en carbono como eólica o solar fotovoltaica, se observa una tarifa de energía competitiva para la energía nuclear.

Por otro lado, la Agencia Internacional de Energía (IEA, siglas en inglés) y la NEA perteneciente a la OCDE han desarrollado una gráfica (figura 7 [32],) que proyecta el costo nivelado de energía (LCOE) para diferentes tecnologías de generación. En esta gráfica, se observa que los costos de generación de energía nuclear se estiman entre USD\$52/MWh y USD\$85/MWh. Este rango de costos, sumado a la capacidad de las centrales nucleares para garantizar un suministro eléctrico continuo a lo largo del año, respalda un caso de negocio viable para la inversión. Además, al comparar el LCOE de la energía nuclear con el de las fuentes fósiles e incluso con otras fuentes bajas en carbono, como la eólica o la solar fotovoltaica, se evidencia que la energía nuclear ofrece una tarifa competitiva en el mercado energético.

El cálculo del LCOE, en este caso, se hizo a una tasa de descuento del 7% y con energía entregada a nivel de barraje de las plantas (no incluye costos de transmisión ni distribución de energía eléctrica), que, inclusive para aquellas centrales nucleares que obtienen un uso extendido una vez finalizado su ciclo de vida programado, se alcanza el LCOE más económico de todas las fuentes de energía, alrededor de USD\$30/MWh como se observa en la figura 7 [32].



Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

Figura 7. Costo nivelado de energía proyectado de generación de energía

Fuente: Tomado de [32].

Capítulo 2

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar un estudio de prefactibilidad legal, técnica, económica y de seguridad de la implementación de un pequeño reactor modular (SMR) para la generación de energía eléctrica en un campo petrolero.

Objetivos específicos

- Evaluar la viabilidad regulatoria a partir del marco normativo de regulación nuclear vigente en Colombia, así como los requisitos y estándares establecidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para identificar el posible despliegue de un pequeño reactor modular en el país.
- Realizar el estudio de prefactibilidad técnica y económica para la implementación de un pequeño reactor modular (SMR) en un campo de producción de petróleo, con el fin de evaluar la integración del reactor al sistema eléctrico, sustituyendo la fuente de energía fósil y reduciendo las emisiones de CO₂.
- Identificar la seguridad operativa del reactor ante eventos transitorios que puedan afectar la potencia entregada por el mismo, mediante el análisis de las simulaciones proporcionadas por el fabricante, para demostrar su capacidad de apagado rápido y seguro en cumplimiento de los estándares establecidos por el OIEA.

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La matriz eléctrica del campo de producción de petróleo analizado, cuyo nombre ni ubicación se pueden indicar por acuerdo de confidencialidad suscrito con la empresa operadora, tiene la mitad de su fuente de energía eléctrica con combustibles fósiles y la otra mitad es abastecida desde la red. Con esto, se puede decir que, al menos la mitad de la energía de esta matriz se puede descarbonizar a través de SMR, incorporando una fuente de energía más resiliente ante desafíos climáticos y de suministro, utilizando menos combustible y área ocupada por unidad de energía generada en comparación con otras fuentes de energía, garantizando, como lo regula el OIEA, el control sobre los residuos desde su minería hasta su disposición final. En la figura 8 [9] se puede observar que las fuentes con energía nuclear son las que menor espacio usan, estando en una media de 8 Ha/TWh/año [9].

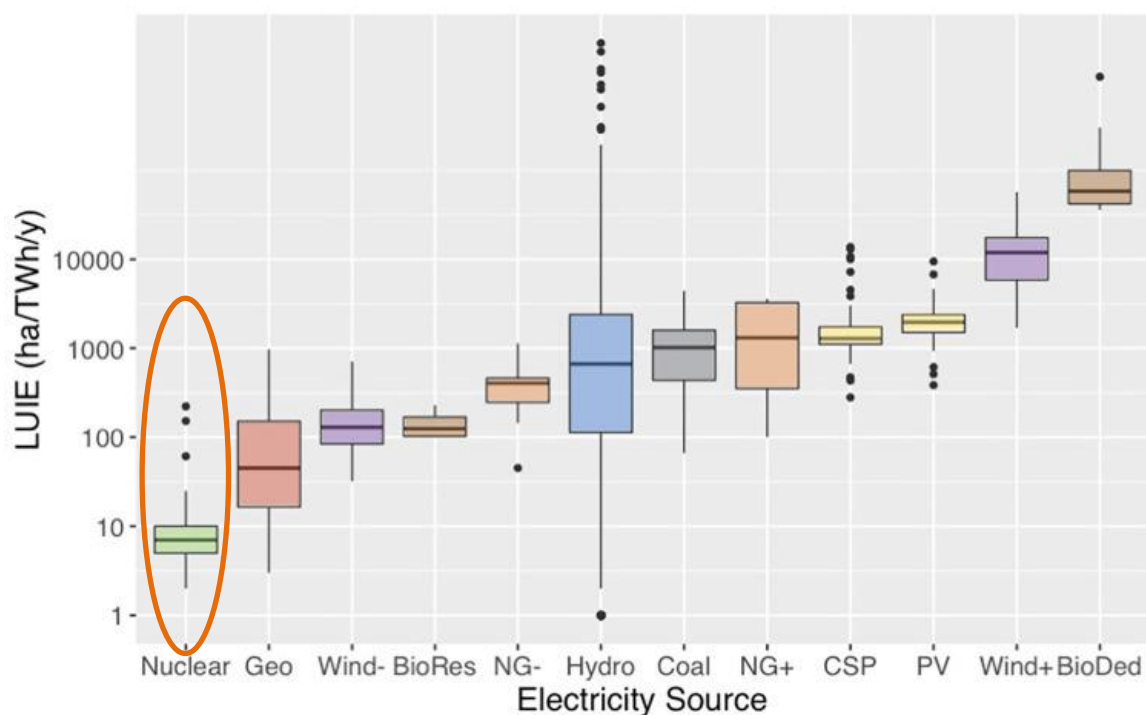


Figura 8. Comparativo uso de suelo diferentes fuentes energéticas

Fuente: Tomado de [9, p. 7].

Hay una oportunidad para Colombia de impulsar la investigación, desarrollo y formación especializada en energía nuclear y, por ende, habrá migración a empleos más especializados en

operación, mantenimiento, investigación y desarrollo de reactores nucleares, particularmente en SMR.

Características del sistema a alimentar

El campo de producción de petróleo cuenta con 350 pozos productores con sistema de levantamiento artificial a través de bombeo electrosumergible, compuesto por una bomba centrífuga multietapa. Cada etapa contiene un impulsor giratorio y difusores estacionarios fundidos normalmente en hierro de alto contenido en níquel para minimizar los daños por abrasión o corrosión. A medida que el fluido del pozo fluye hacia la primera etapa del bombeo electrosumergible, pasa a través de un impulsor, y el fluido es centrifugado radialmente hacia fuera, ganando energía en forma de velocidad. La bomba centrífuga es accionada por un motor de inducción que puede alcanzar velocidades de funcionamiento de más de cinco mil rpm cuando se controla con un variador de velocidad [33].

Estos pozos son alimentados a través de una red de media tensión a 13,8 kV, la cual toma su energía de dos fuentes: la primera desde dos centrales térmicas que suman 50 MW y la segunda a través de una conexión al Sistema de Transmisión Regional (STR) a nivel de 115 kV de donde se toman otros 50 MW para un total de 100 MW con la configuración mostrada en la figura 9 [34].

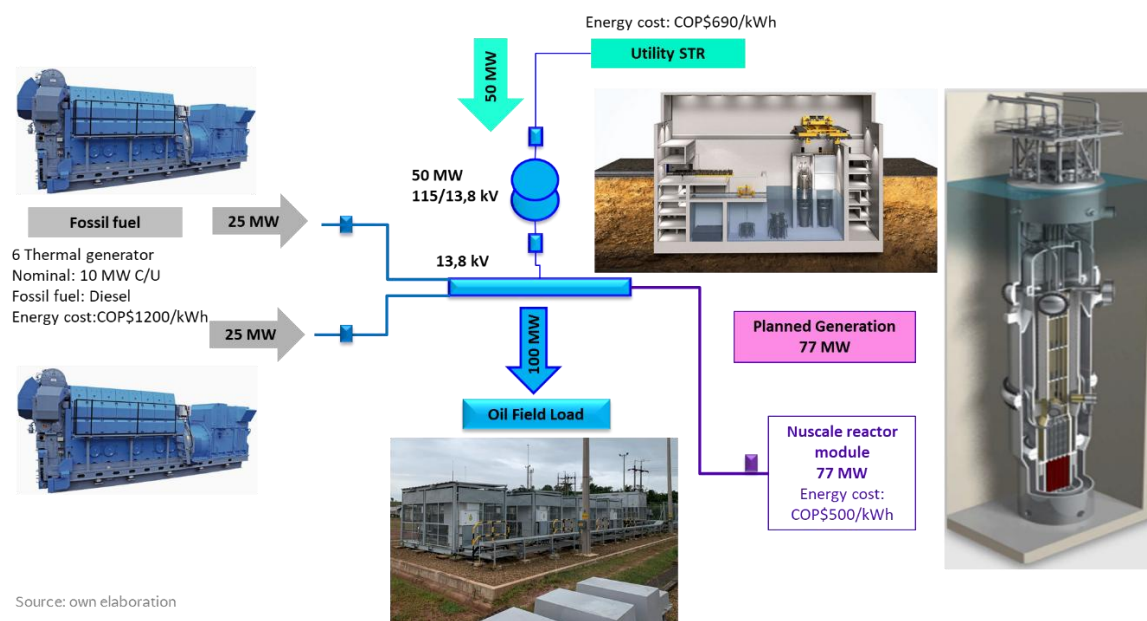


Figura 9. Esquema sistema de generación de energía campo de producción

Fuente: elaboración propia. Imagen del generador [34].

Para determinar la curva de carga diaria y así prever las consideraciones de demanda, se realizaron mediciones con un analizador de redes instalado en el barraje de 13,8 kV. A continuación, se presenta en la figura 10, donde se muestra la curva de carga diaria donde se observa que esta es relativamente constante, lo que indica una operación continua de 365 días al año, representando un sistema industrial desarrollado y permanente.

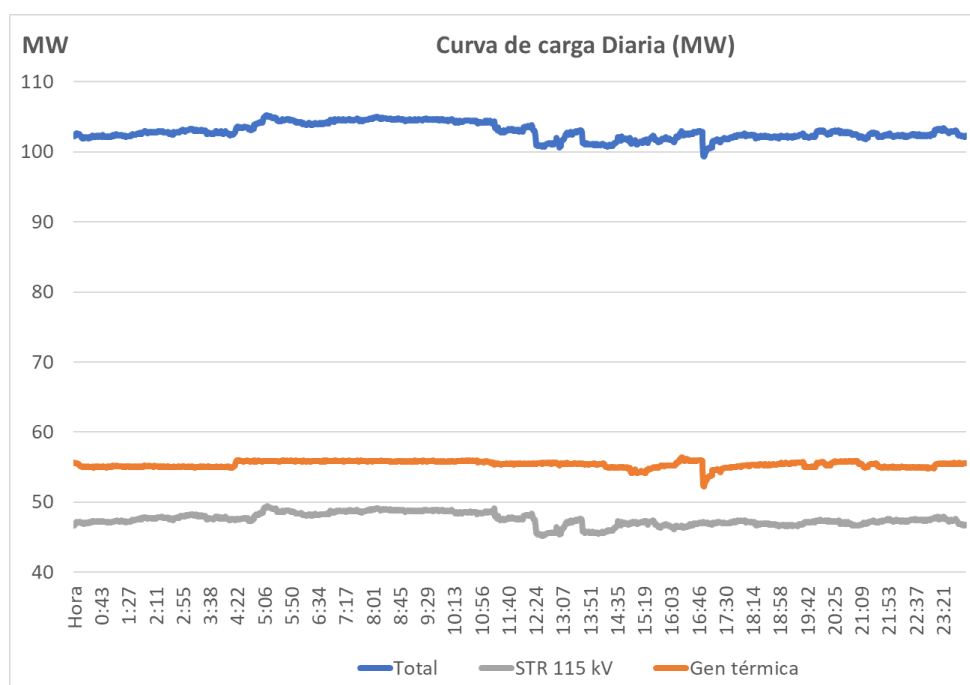


Figura 10. Curva de carga diaria campo de producción. Fuente: elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia

Existen más de ochenta diseños de SMR que están siendo evaluados por el OIEA, de los cuales cincuenta y seis fueron valorados en la segunda edición del documento “The NEA Small Modular Reactor Dashboard 2024” [35], publicado por la OCDE y la NEA. De estos últimos, se seleccionaron diecisiete tecnologías que son las que tienen mayor nivel de madurez tecnológica para poder reemplazar la generación con combustibles líquidos, cuyo comparativo con el SMR se presenta en el capítulo de resultados.

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El OIEA define la fisión nuclear como:

“Una reacción por la que el núcleo de un átomo se divide en dos o más núcleos más pequeños, liberando al mismo tiempo energía. Cuando un neutrón golpea el núcleo de un átomo de uranio 235, este se divide en dos núcleos más pequeños, por ejemplo, un núcleo de bario y un núcleo de criptón, y se liberan dos o tres neutrones. Estos neutrones adicionales golpearán otros átomos de uranio 235 colindantes, que también se dividirán y generarán, a su vez, más neutrones en un efecto multiplicador, desatando así una reacción en cadena en una fracción de segundo [36, Párr. 4] .

Cada vez que se produce esta reacción se libera energía en forma de calor y radiación. Ese calor puede transformarse en electricidad en una central nuclear, en un proceso similar al que se emplea para generar electricidad a partir del calor de combustibles fósiles como el carbón, el gas y el petróleo” [36, Párr. 5] .

El proceso de fisión nuclear se puede apreciar en la figura 11.

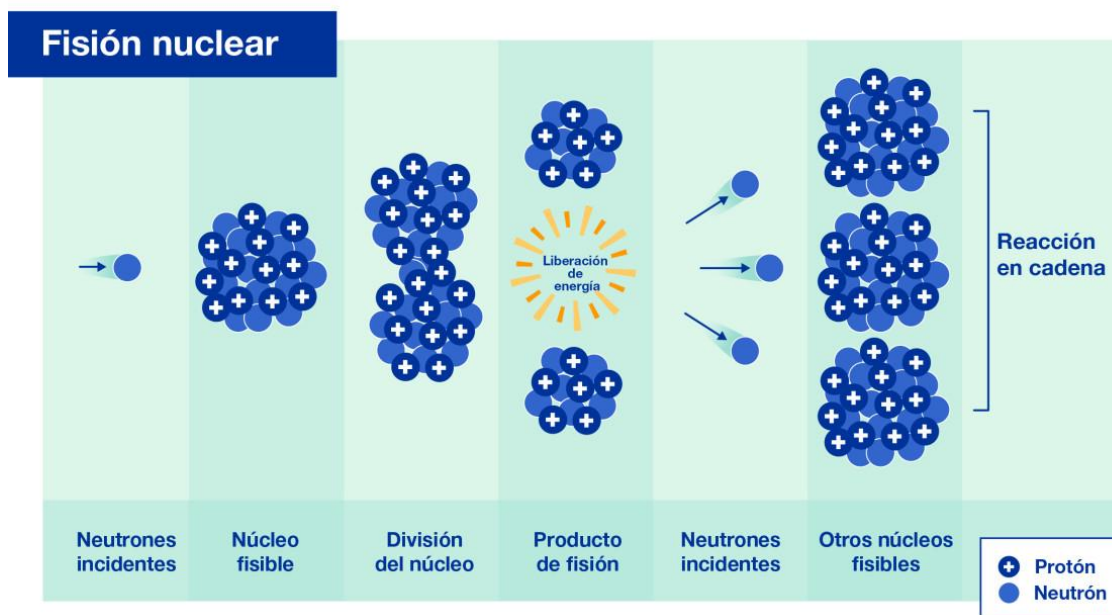
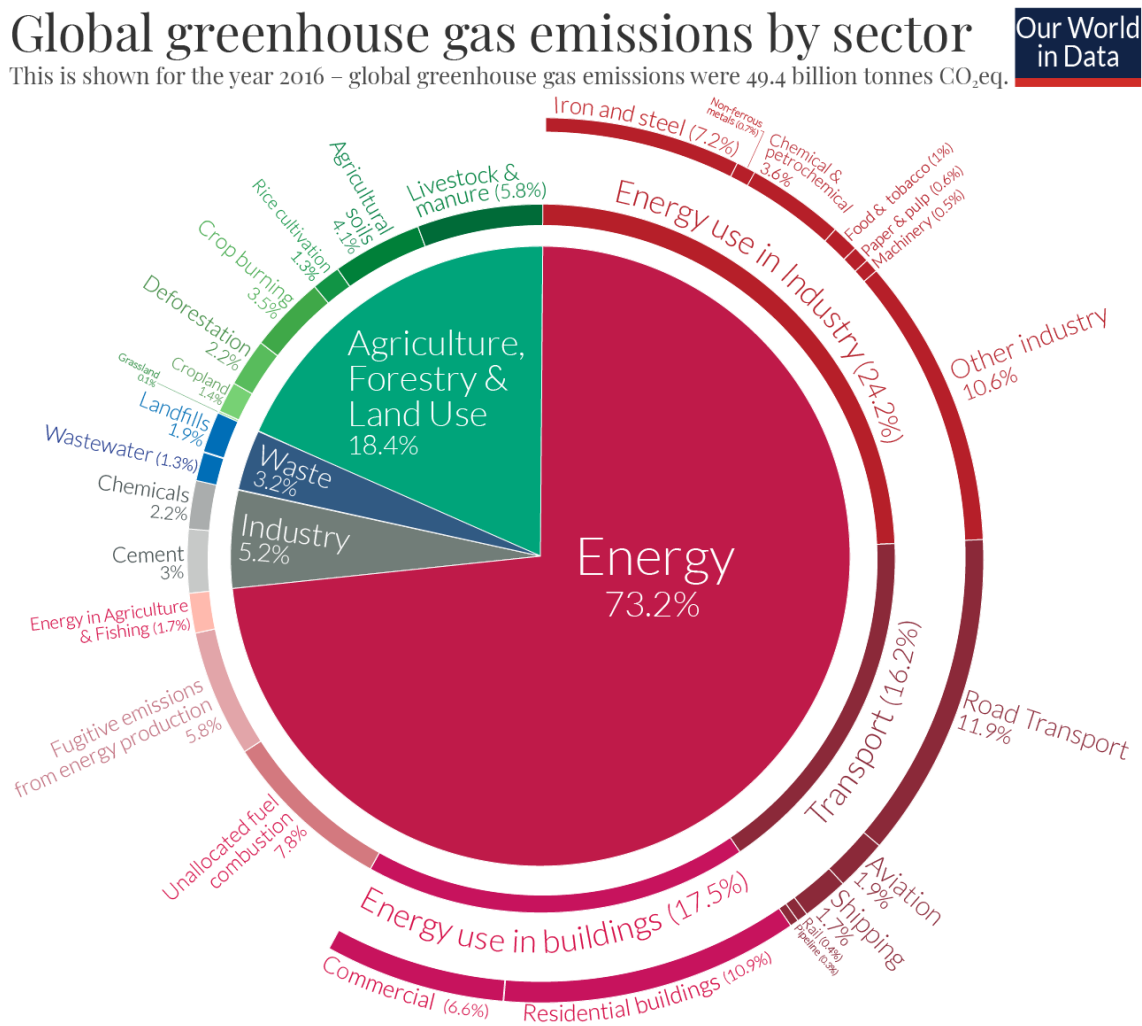


Figura 11. Fisión nuclear

Fuente: Tomado de [36].

Según la figura 12 [37], casi una cuarta parte de los gases de efecto invernadero son emitidos para generar energía en la industria, por lo que los SMR son una alternativa de bajas emisiones para mitigar este impacto.



OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world’s largest problems.
 Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020). Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

Figura 12. Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector

Fuente: Tomado de [37].

4.1 Definición de SMR

PEQUEÑO: Los SMR son más pequeños que los reactores nucleares convencionales a escala de gigavatios, tanto en términos de producción de energía como en tamaño físico. Los SMR son reactores nucleares con una potencia de salida inferior a 300 megavatios eléctricos (MWe), algunos de ellos tan pequeños como entre 1 y 10 MWe [13].

REACTOR: Los SMR utilizan reacciones de fisión nuclear para crear calor que puede usarse directamente o para generar energía eléctrica [13].

MODULAR: Los SMR están diseñados para fabricación modular, producción en fábrica, portabilidad e implementación escalable[13].

Otra ventaja de los SMR es la flexibilidad de implementación, pues ofrecen una amplia gama de configuraciones. Algunos diseños utilizan un enfoque de múltiples módulos para lograr escalabilidad y adaptabilidad al crecimiento de la demanda de energía. Otros, particularmente los microreactores, están diseñados para uso en zonas alejadas o no interconectadas, pequeñas redes aisladas, así como para atención de emergencias. Los SMR también pueden ser adecuados para zonas densamente pobladas y clústeres industriales.

Además, el diseño compacto de los SMR permite una integración en áreas con restricciones espaciales significativas. Esto incluye no solo la ubicación física, sino también la minimización de la zona de exclusión y la reducción del impacto en la infraestructura circundante, lo cual es un aspecto fundamental en áreas urbanas e industriales. Los potenciales beneficios se pueden ver en la tabla 1 [35]:

Tabla 1. Potenciales beneficios de los SMR.

Atributo	Sub-atributo	Beneficios
Flexibilidad operacional	Maniobrabilidad	Seguimiento de carga
	Compatibilidad con sistemas de energía híbridos y multi-generación	Operación económica con el ingreso de generación intermitente
	Uso de combustible diversificado	Economía y seguridad del suministro
	Operación en isla	Sistema resiliente, potencia remota, microrredes o aplicaciones de potencia de emergencia
Flexibilidad de implementación	Escalabilidad	Implementación a la escala necesaria
	Ubicación	Implementación donde se necesite
	Constructibilidad	Implementación a tiempo y dentro del presupuesto
Flexibilidad de producción	Electricidad	Energía eléctrica despachable, confiable y con reducida emisión de CO ₂
	Calor en procesos	Calor de procesos despachable y confiable
	Radioisótopos	Única fuente de isótopos

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la tabla 1, el seguimiento de carga y la integración con sistemas híbridos, ya sea eólico o solar, permitirá la atención de la demanda de energía con SMR integrados a la matriz energética.

Colombia desde la incorporación del reactor nuclear IAN-R1 en 1965, ha tenido un rol de expectante en términos de aplicaciones de núcleo-electricidad, comparado con otros países de Latinoamérica como Argentina, México y Brasil, que ya cuentan con centrales nucleares para generación de núcleo-electricidad. Por lo tanto, si se usa el flujograma sugerido por el OIEA de la figura 13 [38], la hoja de ruta tecnológica sugerida es la de comprar tecnología de países con

experiencia en el aprovechamiento de energía nuclear para fines pacíficos que han trabajado de manera continua en desarrollos de pequeños reactores nucleares y ya presentan avances, como son los casos de Estados Unidos, Francia, Rusia, Corea, China, o en la región como Argentina, que ya está construyendo un reactor con diseño propio llamado “CAREM”, cumpliendo la regulación y las exigencias de seguridad establecidas por el OIEA, cuya puesta en marcha se estima para finales de 2026 o principios de 2027, aunque en julio de 2024 se encontraba temporalmente suspendida su construcción.

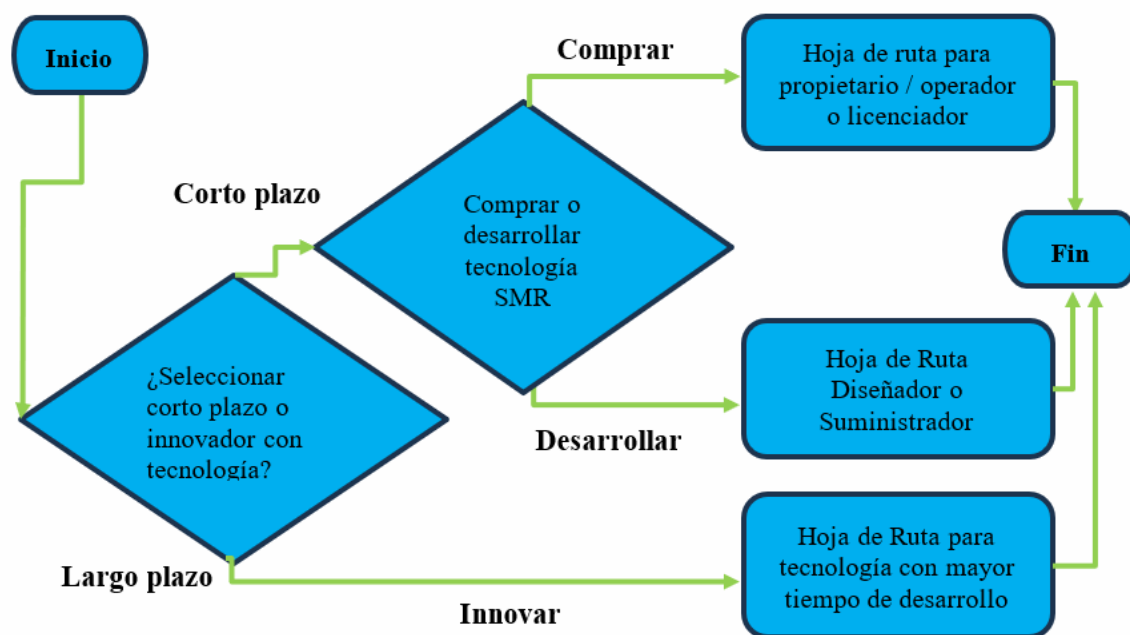


Figura 13 Flujograma básico para hojas de ruta tecnología SMR.

Fuente: Tomado de [38].

4.2 Clasificación de los SMR

Los SMR según la tecnología y el refrigerante usado, se pueden clasificar en cinco grandes grupos: i) reactores de neutrones rápidos “Fast Neutron SMR”, ii) los micro reactores “Micro Modular Reactor (MMR)”, iii) reactores de sales fundidas MSR “Molten Salt Reactor”, iv) reactores de alta temperatura “High Temperature Reactor (HTR)” y de muy alta temperatura enfriado por gas “High Temperature Gas Cooled (HTGR)” y v) reactores refrigerados por agua (Water Cooled Reactor o WCR), dentro de los que sobresalen el reactor de agua presurizada

“Pressurized Water Reactor (PWR)” y el reactor de agua en ebullición “Boiling Water Reactor (BWR)” [38].

La figura 14 [35] representa un esquema que clasifica tecnologías nucleares avanzadas, condiciones habilitantes y mercados potenciales, lo que permitiría evaluar su viabilidad para Colombia.



Figura 14. Habilitando condiciones para entrada al mercado de SMR.

Fuente: Tomado de [35].

A continuación, se describirá el principio general de funcionamiento de cada una de las categorías mencionadas.

4.3 SMR de Neutrones Rápidos “Fast Neutron SMR o FR”

Funcionan en un ciclo cerrado de combustible donde este se reutiliza y se recicla. Tienen el potencial de aumentar entre 60 y 70 veces la energía extraída del uranio comparado con los

reactores térmicos existentes. Como se observa en la figura 15 [6], posee un circuito primario de sodio y un circuito de sales fundidas para transferir el calor. No tienen agua como moderador, cuya función es reducir la velocidad de los neutrones para sostener la reacción de fisión en cadena [38].

Los FR poseen la capacidad de operar bajo condiciones de alta densidad de flujo neutrónico, lo que habilita una flexibilidad única en el ciclo de combustible cerrado. Esta característica permite, por un lado, la reutilización de plutonio y otros actínidos, y por otro, la producción de materiales fisionables secundarios, como el americio, que pueden reciclarse en la cadena de suministro nuclear. Estos aspectos no solo ofrecen una eficiencia superior en el consumo de recursos nucleares, sino que también reducen el requerimiento de almacenes geológicos profundos o repositorios de residuos de alta actividad radiactiva. Sin embargo, el manejo y la contención de estos actínidos requiere un diseño meticuloso de las barreras físicas y un análisis exhaustivo del transporte de calor y las propiedades de los materiales para garantizar la estabilidad durante los ciclos de quemado prolongado [38].

Debido a su particular física, los FR son muy flexibles y pueden diseñarse como reproductores, quemadores o reactores de uso general. Cuando se diseñan como reproductores, los FR producen más combustible del que consumen. Como quemadores, están diseñados específicamente para minimizar el volumen, la carga térmica y la vida útil de los residuos nucleares más peligrosos, reduciendo así drásticamente los requisitos del repositorio geológico. En ambos casos, para ser eficaz, la tecnología requiere un ciclo de combustible cerrado, incluido el procesamiento del combustible.

Los FR de uso general tienen un mayor quemado de combustible, un ciclo de combustible más largo y/o temperaturas de refrigerante más elevadas. Son especialmente adecuados para producir electricidad con mayor eficiencia o para aplicaciones no eléctricas (por ejemplo, la producción de hidrógeno). Algunos proyectos no requieren reprocesamiento en el país de despliegue. Otra ventaja de los reactores rápidos (FR) refrigerados por metal líquido es que funcionan a muy baja presión [38].

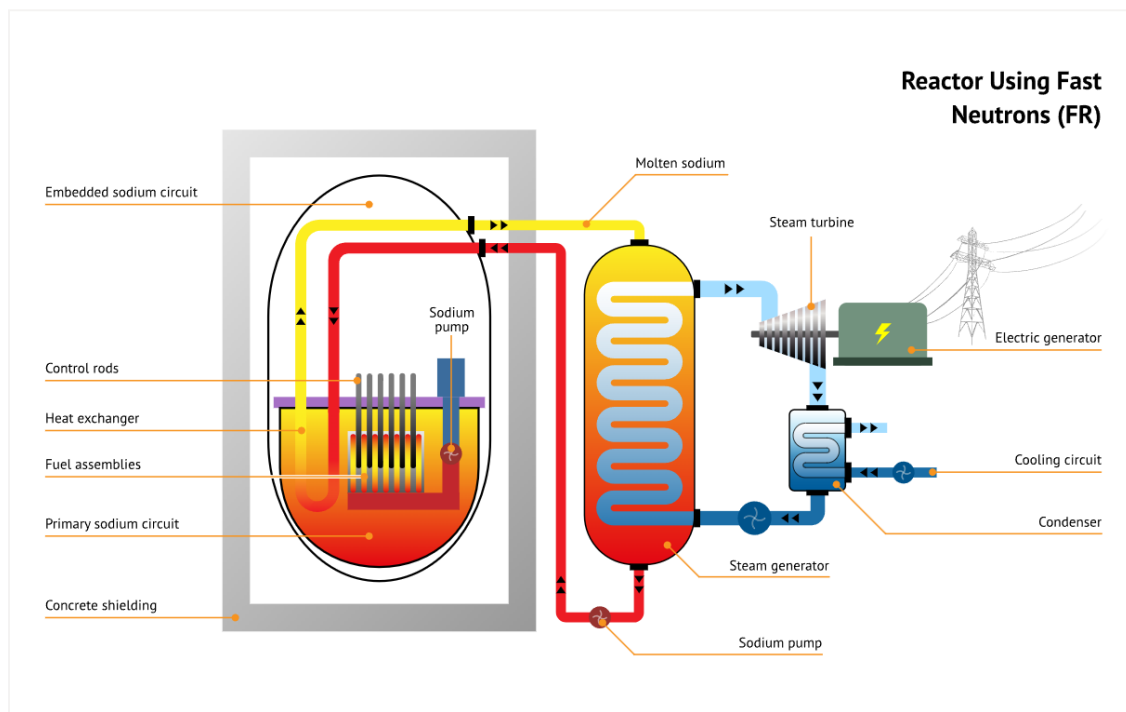


Figura 15. SMR de neutrones rápidos “Fast Neutron SMR o FR”

Fuente: Tomado de [38].

El diseño de los FR incluye la capacidad de operar bajo ciclos cerrados de combustible, donde el reprocesamiento in-situ del combustible se convierte en un factor crítico de su viabilidad económica y ambiental. Estos reactores se ubican en el umbral de una revolución en la eficiencia del ciclo de combustible nuclear, utilizando hasta 70 veces más del uranio que los reactores térmicos. Esto implica un desarrollo de nuevas estrategias para la mitigación de residuos y la optimización de su densidad energética en condiciones operativas avanzadas [38].

Gracias a su flexibilidad, los reactores nucleares pueden adaptarse a las distintas políticas y necesidades nucleares nacionales. Si el objetivo es preservar el uranio natural (por ejemplo, en países que prevén explotar un gran parque de centrales nucleares), los reactores nucleares pueden funcionar como reproductores. Si el objetivo es minimizar las reservas de plutonio y/o reducir el número y los requisitos de los depósitos geológicos, los FR pueden funcionar como quemadores. Incluso desde un punto de vista estratégico, la motivación para desarrollar un programa de FR puede ser muy diferente en los distintos países. Por ejemplo, Japón está desarrollando un programa de FR debido a la falta de recursos energéticos tradicionales. La Federación Rusa dispone de

suficientes recursos de combustibles fósiles, pero está plenamente comprometida con el desarrollo y despliegue de FR para alcanzar futuros objetivos estratégicos (incluida la exportación) y mantener el liderazgo tecnológico. La explotación y el mantenimiento son más difíciles que los de los WCR [38].

No obstante, la operación en ciclo cerrado implica una infraestructura nuclear avanzada que incluye reprocesamiento, reciclaje de actínidos menores y control preciso del inventario isotópico. Actualmente, Colombia no dispone de estas capacidades, por lo que el despliegue de FR en el corto plazo no es viable sin cooperación internacional o sin una estrategia de infraestructura escalonada. En ese sentido, si bien los FR representan una frontera tecnológica, su aplicación en el país requeriría una hoja de ruta específica, donde se contemple la instalación de plantas de separación química y licenciamiento especializado en manejo de actínidos transuránicos.

4.4 Micro Reactores Modulares (MMR)

Buscan generar energía hasta 10 MW(e). Esta tecnología avanzada, generalmente incluida como una subcategoría de los SMR, se está desarrollando especialmente en Canadá, China, Rusia, Estados Unidos y varios Estados Miembros de la Unión Europea. Los MMR tienen características únicas. En mayor medida que otros SMR, pueden construirse completamente en una fábrica, transportarse más fácilmente a los sitios y conectarse al usuario final de energía eléctrica y calor [38].

Incorporando las particularidades de seguridad pasiva de los diseños de SMR de cuarta generación, estos microreactores también pueden ser autorreguladores, basados en sistemas de seguridad inherentes y pasivos, y así lograr un alto nivel de control y seguridad con acciones mínimas del operador. Tampoco se limitan a un tipo específico de moderador, refrigerante o rango de energía de neutrones, y exhiben características muy diferentes. Por ejemplo, los refrigerantes pueden incorporar helio, plomo, aire, agua, metal líquido y tubos de calor. Los MMR también suelen estar cargados durante toda la vida útil del reactor. Para que el despliegue se convierta en realidad, estos pequeños generadores eléctricos, también deberán tener una seguridad adecuada y características que permitan su aporte a la no proliferación de armas nucleares, en la figura 16 [39] se ilustra el diagrama de un MMR refrigerado por gas helio que sirve para transferir el calor hasta

la turbina, puede o no incorporar un intercambiador de calor para extraer calor en diferentes etapas [38].

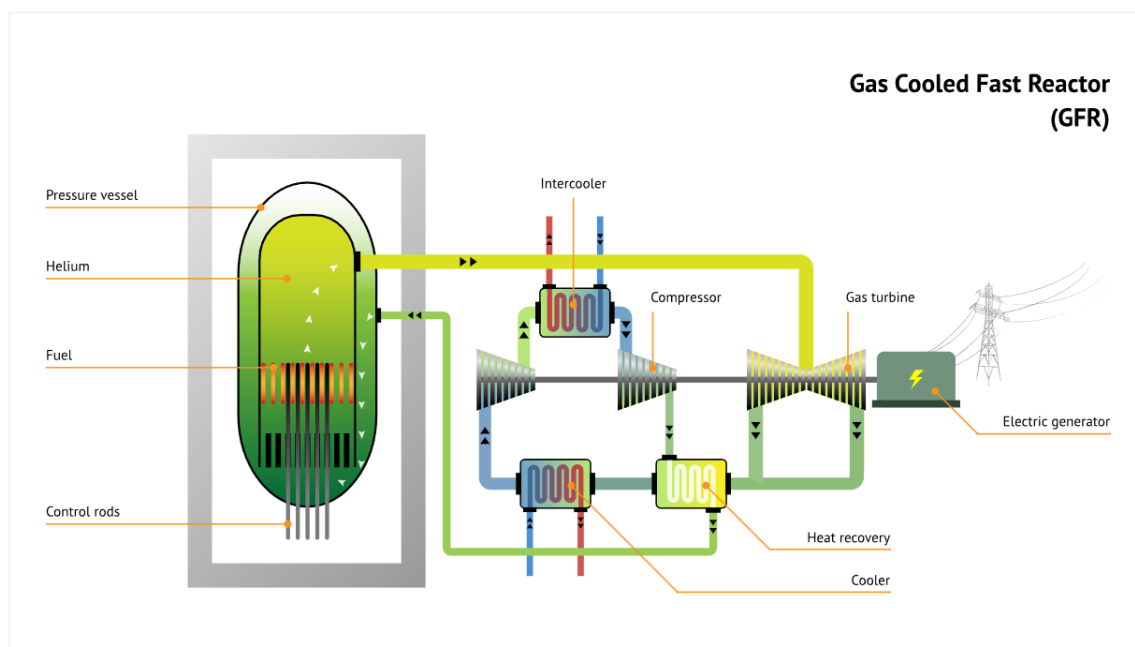


Figura 16. Micro Reactores Modulares (MMR) refrigerado por gas

Fuente: Tomado de [39].

Los MMR están concebidos para atender nichos de mercado de energía eléctrica y pequeños distritos de calor en sitios remotos (comunidades árticas o insulares), operaciones mineras, industria aeroespacial y pesqueras, para proporcionar energía de respaldo en centros de datos, para servir a plataformas petrolíferas, para ser utilizados en transporte marítimo o atención de desastres. Estos mercados han sido atendidos históricamente por unidades de generación diésel durante décadas donde entrarán a competir los MMR [38].

Los microreactores modulares (MMR) representan una oportunidad sin precedentes para descarbonizar sectores de difícil acceso y áreas aisladas que tradicionalmente han dependido de generadores diésel. Estos reactores, con capacidades de hasta 10 MW(e), permiten una operatividad segura y controlada gracias a sus características de seguridad pasiva y a su diseño compacto, que reduce significativamente la huella ambiental. Además, la capacidad de los MMR para operar con ciclos de vida de combustible extendido y sistemas de control autoadaptativos los

hace altamente eficientes en términos de manejo de recursos. Esto permite que los MMR se implementen rápidamente en zonas de alta vulnerabilidad climática, ofreciendo una fuente de energía estable y de bajo impacto [38].

Algunos expertos como Francesco Venneri de Ultra Safe Nuclear (USNC) [40] o Alex Harkness, Chief Engineer de Westinghouse Electric Company diseñadores del MMR “Evinci” [41], ven los MMR como la vía de entrada para el despliegue de los SMR, especialmente porque inicialmente el argumento comercial puede ser más favorable para ellos, ya que actualmente no existen otras soluciones fuera de la red y los generadores diésel son costosos de operar y contaminantes.

En 2019, Global First Power presentó una solicitud de instalación para un único SMR, utilizando la tecnología de MMR de Ultra Safe Nuclear Corporation, en el sitio de Chalk River Laboratories en el condado de Renfrew, Ontario [42]. El MMR produciría aproximadamente 15 MW térmicos de calor de proceso para generar energía eléctrica y/o calor, durante una vida útil operativa de 20 años. El proceso de evaluación ambiental se inició en julio de 2019 y tiene la siguiente línea de tiempo [40]:

Desarrollo del proyecto:	2016-2021
Preparación de sitio y construcción:	2021-2027
Operación de la planta:	2023-2054
Decomisionamiento:	2044-2058
Abandono:	2058-2060

4.5 Reactor de sales fundidas (Molten Salt Reactor o MSR)

El MSR se distingue por su combustible disuelto en sal fundida, como se observa en la figura 17 [43], el calor se transfiere a un intercambiador de calor a través de un circuito primario que posteriormente alimenta la turbina por intermedio de un circuito secundario, aunque algunos diseños utilizan combustible sólido y sal fundida como refrigerante. Es interesante en términos de eficiencia (temperaturas más altas), seguridad (baja presión y combustible en estado fundido), sostenibilidad (por ejemplo, a través de un ciclo de combustible cerrado con reprocesamiento en línea) y reducción de desechos.

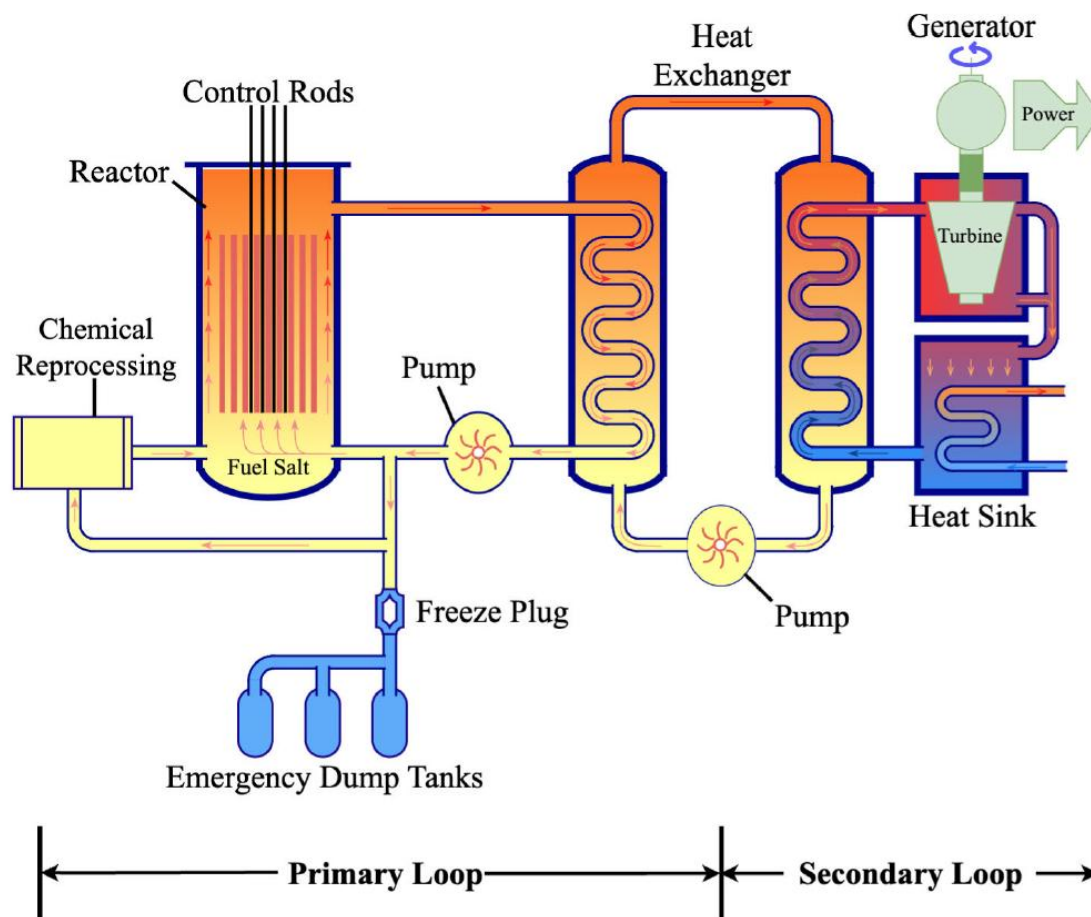


Figura 17. Reactor de sales fundidas (MSR).

Fuente: Tomado de [43].

La tecnología se desarrolló y demostró en parte en el reactor experimental de sales fundidas del Laboratorio Nacional de Oak Ridge en los Estados Unidos de América (1965-1969). Sin embargo, aún es necesario evaluar su viabilidad técnica, especialmente el rendimiento a largo plazo de los materiales estructurales en sales fundidas. Los diseñadores de MSR centran sus esfuerzos en resolver temas asociados a la resistencia y durabilidad de materiales, mejorar las condiciones de seguridad, desarrollar métodos de diseño de núcleo óptimos y evaluar los modelos económicos [44].

El sistema de enfriamiento de los MSR aprovecha la conductividad térmica de la sal fundida, permitiendo operar a alta eficiencia sin necesidad de presurización, a diferencia de los reactores de agua ligera. Este diseño reduce el riesgo de fugas radiactivas en caso de falla del

sistema de contención, dado que la sal se solidifica en condiciones de baja temperatura, encapsulando los productos de fisión y minimizando la dispersión en el ambiente.

Los reactores de sales fundidas ofrecen una ventaja particular en cuanto a seguridad pasiva debido a su operación a baja presión. Esta característica minimiza el riesgo de fugas y permite un diseño compacto y eficiente en la gestión de riesgos, que es relevante en instalaciones ubicadas cerca de áreas pobladas.

Otros retos son la aceptación de sus características de seguridad en la concesión de licencias y también algunos compromisos en la NO proliferación de armas. Aunque algunos de los aspectos relacionados con la proliferación (por ejemplo, el reprocesamiento en línea) pudieran resolverse técnicamente, pues desde el punto de vista político es posible que sólo se permita su despliegue en países que permitan el reprocesamiento. Algunas empresas con nuevos diseños ya ofrecen MSR específicos en el mercado, pero no se prevé su despliegue comercial a gran escala antes de 2030, aunque los reactores de demostración podrían estar operativos durante este plazo (actualmente se está desarrollando un reactor de prueba de sales fundidas en China) [38].

4.6 Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas (HTGR)

Es un reactor nuclear de fisión refrigerado por helio como el mostrado en la figura 18 [45], que usa grafito como moderador (para controlar la velocidad de los neutrones y mantener una reacción nuclear en cadena) y utiliza combustibles totalmente cerámicos [46], por ejemplo, el combustible se encapsula en esferas recubiertas por tres capas de materiales a base de cerámica y carbono que bloquean la emisión de productos de fisión radiactivos y estas esferas son las que circulan en el núcleo del reactor. Tiene características de seguridad inherentes y una excelente retención de productos de fisión en el combustible y el grafito en comparación con la tecnología de reactor nuclear convencional [46], [47].

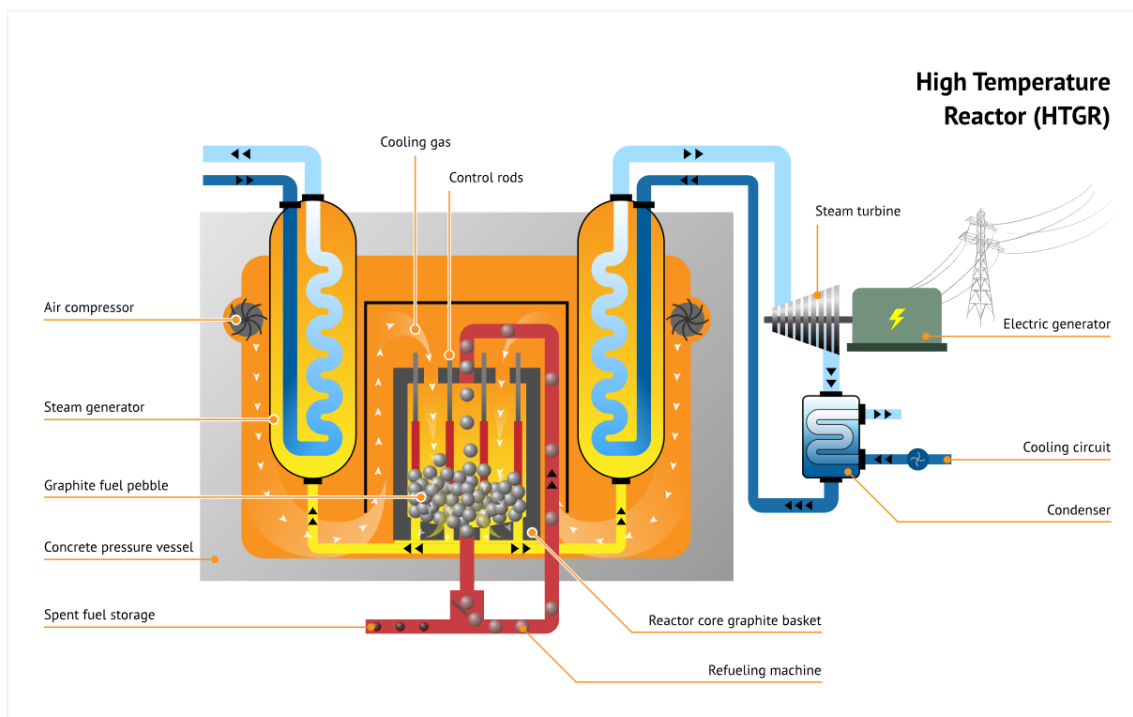


Figura 18. Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas (HTGR)

Fuente: Tomado de [45].

Como su nombre lo indica, la temperatura de salida del reactor, típicamente esta entre 750°C y 950°C , es significativamente más alta que la de los reactores nucleares convencionales; por ejemplo, la temperatura de salida estándar para reactores de agua a presión es de alrededor de 320°C . Esta alta temperatura de salida no sólo aumenta las eficiencias de conversión de la generación de energía eléctrica, sino que también amplía las oportunidades para utilizar el mayor calor como calor de procesos industriales en un rango de temperatura más alto que es difícil de alcanzar con los reactores nucleares convencionales.

En despliegues posteriores, la temperatura de funcionamiento podría alcanzar más de 950°C . Sin embargo, estos reactores requerirán el uso de nuevos materiales estructurales [46]. El primer HTGR se propuso en un estudio de diseño de 1945 en los Estados Unidos. En la década de 1960, surgieron HTGR experimentales en el Reino Unido, Estados Unidos y Alemania, seguidos por pilotos a escala comercial en Estados Unidos y Alemania, reactores que operaron desde mediados de la década de los setenta hasta principios de la década de los noventa.

Las experiencias operativas y las mejoras de diseño se reflejan en los dos HTGR experimentales que actualmente están operando en Japón y la República Popular China. Estos reactores han demostrado un funcionamiento estable y un rendimiento de seguridad del sistema sin ningún problema técnico significativo [48].

4.7 Reactores Refrigerados por Agua (WCR)

De los 442 reactores en operación hoy en día, el 95%, son refrigerados por agua [49], los cuales han sido preponderantes en la historia de la industria nuclear, principalmente en el siglo XX, que en un principio obtuvieron licencias de explotación por 40 años, y que, dado el adelanto tecnológico, se está extendiendo a 60 años, con la opción de ampliarlas por un tiempo mayor. Para el presente siglo, se proyecta que los WCR sigan dominando la generación de energía, toda vez que gran parte de los diseños de reactores son refrigerados por agua [49].

Los WCR necesitan uranio 235 como combustible enriquecido en el isótopo fisible, y de ellos se han estandarizado en mayor proporción los reactores de agua ligera (LWR) que se dividen en dos tipos BWR y PWR. Los reactores de agua presurizada (PWR), ver figura 19 [50], tienen dos o tres ciclos independientes de vapor, así garantizan que el agua que llega al generador no contenga elementos radiactivos, asegurando que el personal de mantenimiento del generador no se exponga a radiación, dado que el generador recibe el vapor por transferencia de calor de uno o dos circuitos previos [50].

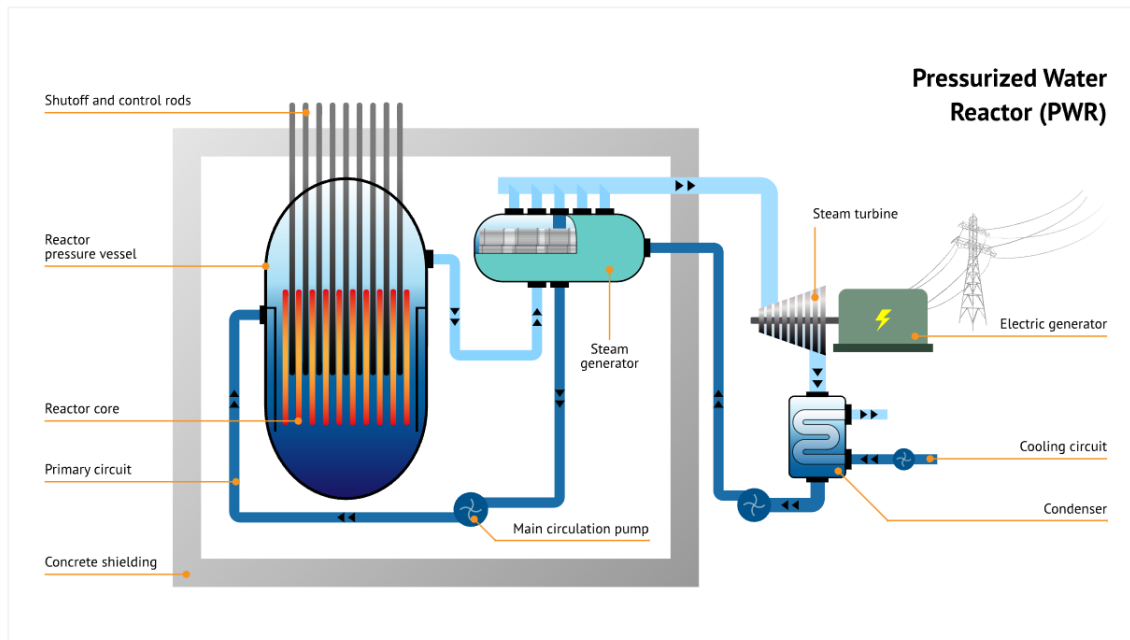


Figura 19. Reactores de Agua Presurizada (PWR).

Fuente: Tomado de [50].

Los reactores de agua en ebullición (BWR) como el mostrado en la figura 20 [51], al tener un solo ciclo de vapor, utilizan el mismo vapor generado en el interior del núcleo del reactor directamente en la turbina del generador, tienen la desventaja de manejar agua radiada en la turbina del generador; esto incorpora unos riesgos de exposición a la radiactividad para el personal que ejecuta el mantenimiento del generador.

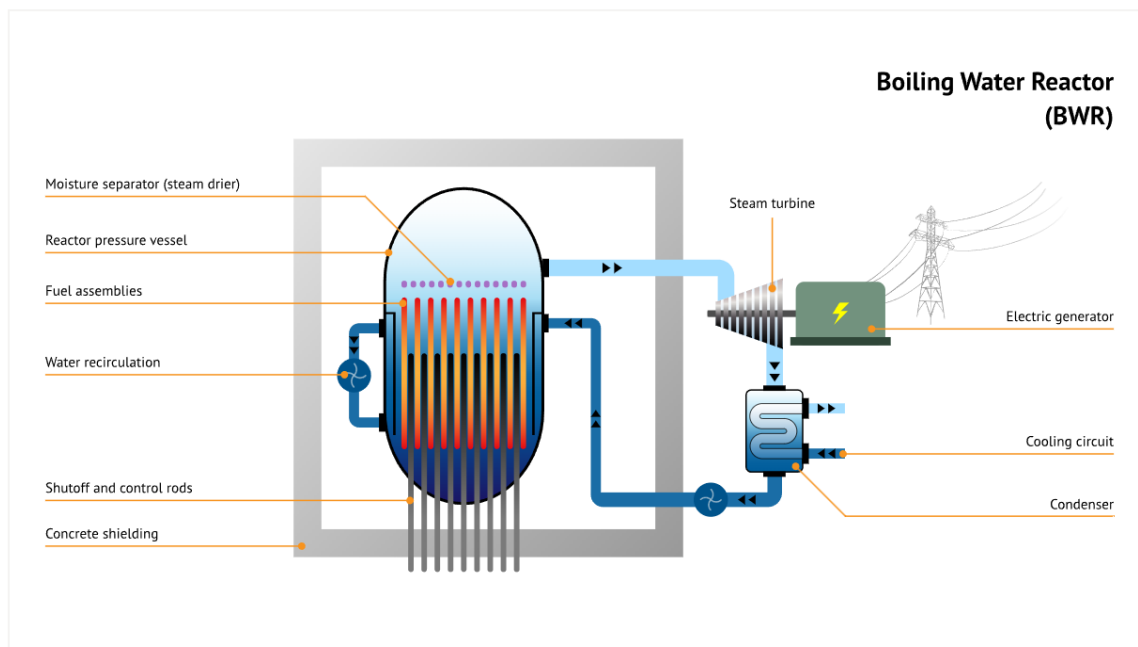


Figura 20. Reactores de Agua en Ebullición (BWR).

Fuente: Tomado de [51].

El agua “enriquecida” se usa en los reactores de agua pesada (HWR), sus moléculas contienen átomos de hidrógeno compuestos en más de un 99 % de deuterio, un isótopo del hidrógeno que es más pesado que el tritio. Esta agua pesada, aporta a la economía neutrónica general, mejorando la relación entre neutrones producidos y neutrones perdidos por absorción o fuga, permitiendo a su vez la utilización de un combustible que no necesita enriquecimiento y es empleada como moderador, [49].

Durante el último medio siglo de explotación de los WCR, la mayoría de las lecciones aprendidas, incluyendo los tres accidentes más graves, han servido para mejorar el diseño de las diferentes generaciones de los WCR, agrupando adelantos en su construcción y pruebas, capas de seguridad mejoradas, seguridad pasiva, tecnologías de construcción en fábrica, mejor uso de los recursos y progresos en la parte financiera. Los WCR avanzados incorporan sistemas de seguridad pasiva, que no necesitan intervención humana ni suministro de energía eléctrica, dado que incluyen inventarios de agua más grandes, de modo que, en caso de condiciones imprevistas, como un cese extenso de la planta, se podría atender la situación por días y no horas, usando este inventario de agua para refrigerar el núcleo del reactor [49].

Los reactores supercríticos refrigerados por agua (SCWR), pretenden mejorar el rendimiento térmico del reactor y su economía, usando agua a presiones y temperaturas por encima de su punto crítico, conocida como agua supercrítica, en donde no se pueden diferenciar los estados gaseoso y líquido, usada principalmente en plantas actuales cuyo combustible puede ser petróleo, gas y carbón. Se proyecta que los SCWR sean un 30% más eficientes que los WCR tradicionales [49].

4.8 Gestión de residuos radiactivos

Lo define la OIEA en su documento IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, 2022 [52], como todas las actividades operacionales y administrativas involucradas en el manejo, pretratamiento, tratamiento, acondicionamiento, transporte, almacenamiento y disposición de los residuos radiactivos; se resalta que la energía nuclear, es la única fuente que hace la gestión completa de los residuos desde su extracción hasta su disposición final. Por ejemplo, solo se almacenarán de manera temporal en el país donde fueron usados y por requisito del OIEA deben regresar al país de origen. En la figura 21 [52], se observan todas las actividades que son de carácter obligatorio para la gestión de los residuos radiactivos.

En el contexto de los SMR, la gestión de residuos presenta particularidades debido a su diseño modular y a la posibilidad de implementar ciclos de vida de combustible extendido. Los sistemas de SMR, especialmente aquellos que operan bajo un ciclo cerrado de combustible, permiten reducir significativamente el volumen y la actividad de los residuos mediante procesos de reprocesamiento en línea. Esto no solo disminuye la cantidad de desechos de alta actividad, sino que también optimiza la eficiencia del uso de materiales fisibles. Para los residuos que deben ser almacenados, se han desarrollado técnicas avanzadas de encapsulación en matrices cerámicas y almacenamiento en sistemas de contención pasiva, que proporcionan una barrera adicional de seguridad radiológica a largo plazo.

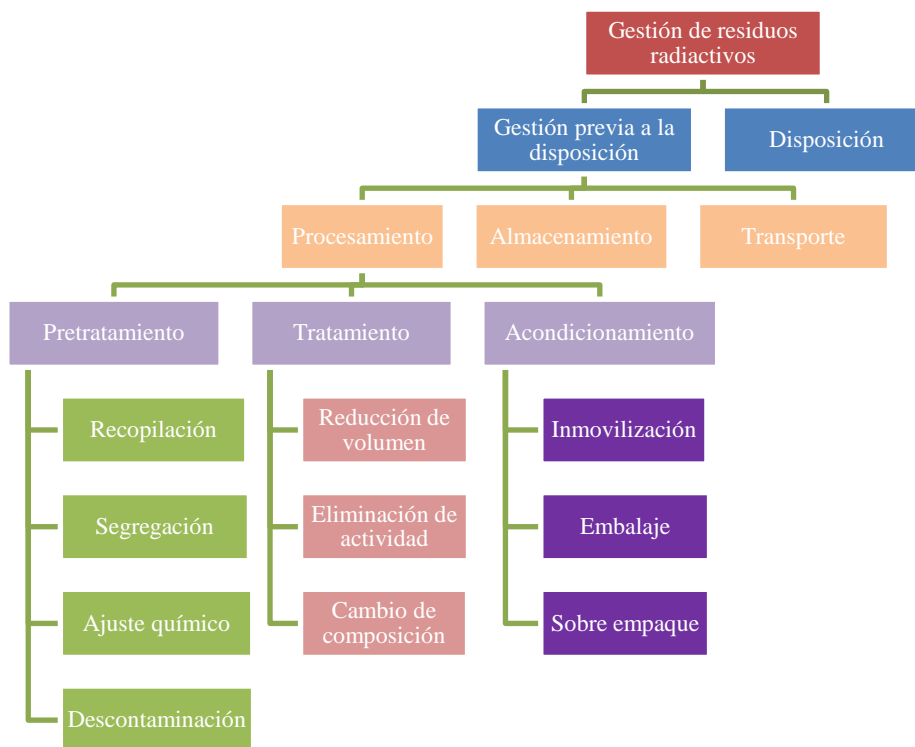


Figura 21. Actividades involucradas en la gestión de residuos radiactivos

Fuente: Tomado de [52].

Como lo resume el ingeniero David Andrés Galeano Gonzalez de la Dirección de Regulación de Energía de EPM en su artículo “Desmantelando mitos de la energía nuclear”, escrito para la revista EPM (2023):

“Es importante saber que una vez utilizado el combustible no se desecha inmediatamente. Cuando las barras de uranio han agotado su capacidad de generar calor suficiente para mover la turbina, estas son retiradas y repotenciadas por métodos químicos para ser utilizadas nuevamente en otras plantas nucleares o procesos relacionados con materiales radiactivos, como por ejemplo la medicina nuclear, la agricultura, entre otros. Alrededor de esto existe una enorme industria que se encarga de repotenciar y reutilizar el combustible nuclear” [53, p. 8].

4.9 Ciclo de vida de los SMR

Dentro del ciclo de vida de los SMR estimado entre 60 y 80 años, es pertinente aclarar que el combustible usado es menor que el de una central convencional, y se conserva la misma rigurosidad en los pasos para su disposición final. Para garantizar el cierre del ciclo de vida de los SMR, uno de los elementos facilitadores es la modularidad en la construcción, pues estos elementos se podrán retirar de la misma manera, una vez finalizada la fase de operación y así posteriormente realizar el respectivo de-comisionamiento donde se remarca que también se realizará de manera modular, haciendo una analogía a esa misma ventaja usada en la construcción de los SMR.

La figura 22 ilustra las fases del ciclo de vida del SMR (cuadros naranjas), incluidos los pasos del ciclo del combustible (cuadros azules), donde las operaciones del SMR conectan ambos pasos del ciclo del combustible nuclear con las fases del ciclo de vida, tomado de Godsey, Kara Michelle, "Life Cycle Assessment of Small Modular Reactors Using U.S. Nuclear Fuel Cycle" [54].

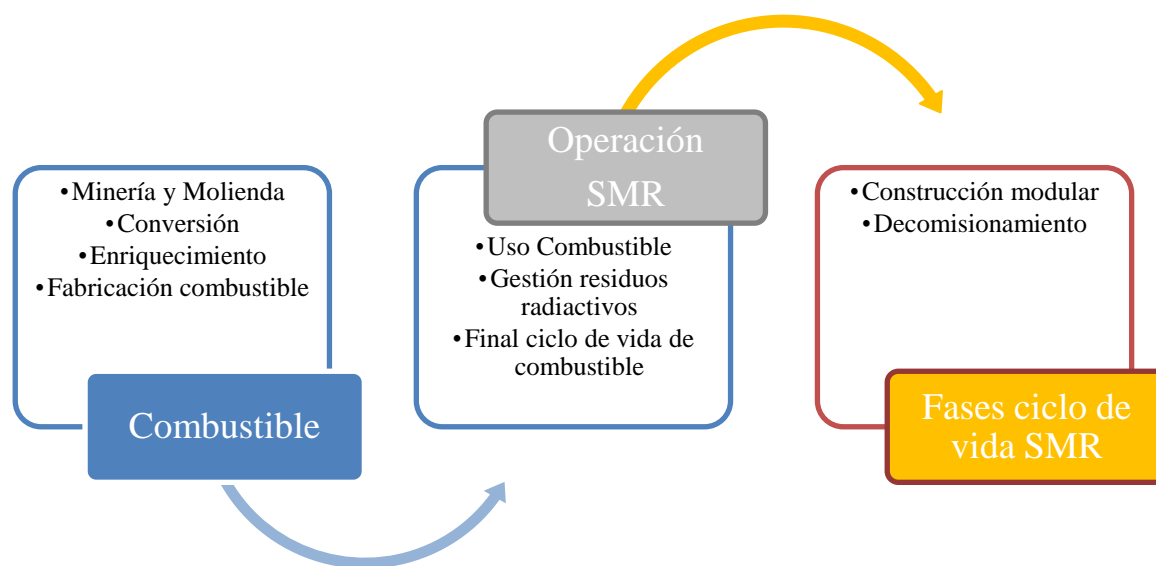


Figura 22. Ciclo de vida de los SMR

Fuente: Tomado de [54].

Así las cosas, se observa que el cierre del ciclo de vida, tanto de los SMR como del combustible usado, está asegurado en los requerimientos del OIEA.

4.10 Estado del arte en generaciones de reactores

Se hará foco en los reactores de generación III+ (algunos en construcción) y generación IV dado que son los diseños que tendrán mayor despliegue en la siguiente década y han incorporado las lecciones aprendidas a lo largo de sesenta años de operación de reactores nucleares de las generaciones anteriores. Lo anterior ha permitido mejorar su modularidad, estructura de costo y aspectos de seguridad.

La figura 23 [55] muestra las diferentes generaciones de reactores a lo largo del tiempo. La generación I, operada entre los años cincuenta y sesenta principalmente fueron prototipos. La generación II inició en los años setenta y corresponden a la mayoría de los reactores que están operando actualmente. La generación III fue diseñada en los noventa, incorporando avances en seguridad y costos, principalmente están en Asia. La Generación III+ es una mejora en cuanto a métodos de construcción e incorporación de elementos de seguridad, actualmente hay varios en construcción y se espera que inicien su operación alrededor del 2030. Los reactores de generación IV ajustaron su modularidad, funciones de seguridad mejorada, optimización en el uso de combustible y condiciones más severas para evitar su uso en la proliferación de armas.

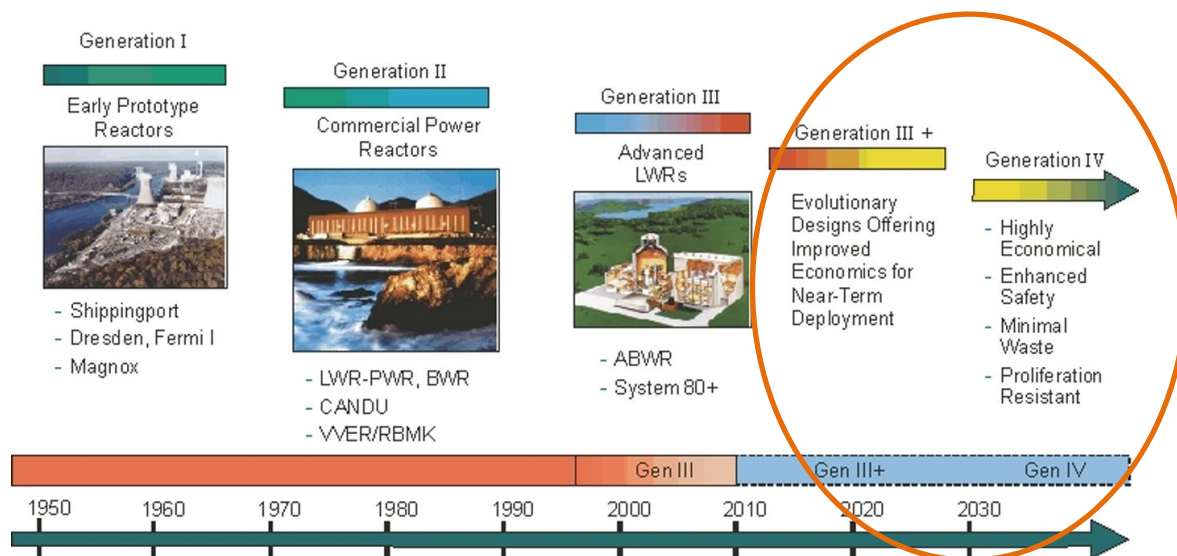


Figura 23. Generaciones de reactores nucleares

Fuente: Tomado de [55].

4.11 Estado del arte en operación de reactores

En el anexo 1 [27], se observa que con corte a junio de 2024 había 418 reactores operando en 31 países con una capacidad instalada de 371.5 GWe, que como se observó en la figura 1, tiene una participación aproximada del 10% en la canasta energética mundial.

A nivel global hay en construcción 59 reactores nucleares en 17 países con una capacidad a incorporar de 61 GWe, liderado por China con 24 reactores y un estimado de 25 GWe, seguido por India con 4 reactores sumando 6 GWe y Turquía con 4 reactores y una capacidad de 4,4 GWe, solo estos tres países están instalando el 58% de la capacidad a incorporar en los próximos cinco a diez años [27].

La Agencia Internacional de Energía, en su reporte el camino para una nueva era de la energía nuclear, estima que más de mil (1000) SMR estarán en operación para 2050, adicionando una capacidad instalada de 120 GWe principalmente en China, Estados Unidos, La Unión Europea, India y el Reino Unido, como se ve en la figura 24 [56]. La incorporación de SMR están tomando relevancia dada su modularidad, menores tiempos de construcción, apoyo de los gobiernos, menores costos y nuevos modelos de negocios, que permitirán tener una energía gestionable, continua y limpia, impulsada también por el incremento de la demanda del sector privado [56].

By 2050, over a thousand small modular reactors could deliver combined capacity of 120 gigawatts

Small modular reactor (SMR) capacity in leading markets in the Announced Pledges Scenario

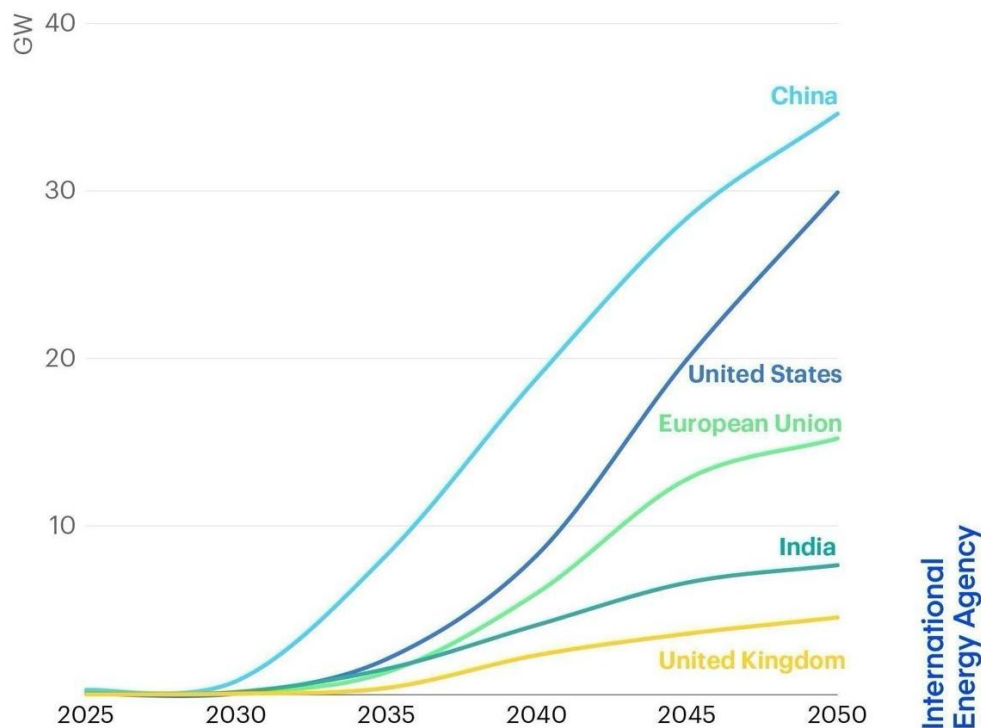


Figura 24 Proyección IEA despliegue reactores nucleares hasta 2050

Fuente: Tomado de [56].

4.12 Estado del arte en costos

En la tabla 2 [26] se listan los costos de inversión por MW (CAPEX) de las centrales que han entrado en operación desde 2023 hasta las que entrarán a finales de 2025.

Tabla 2. Costos CAPEX por MW de las centrales que entran en operación.

Economics of selected large-scale plants recently commissioned or under development

Rystad

Plant	Location	Capacity (MW)	Planned start-up	Cost (USD billion)	Capex (USD million per MW)
Hinkley Point C	UK	3,260	Jan-31	44	13.5
Flamanville 3	France	1,650	Jun-24	20.6	12.5
Shidaowan 1	China	1,500	Jun-25	7.9	5.3
Barakah 3	UAE	1,400	Feb-23	6.1	4.4
Shin Hanul 1	South Korea	1,340	Dec-22	6	4.5
Shin Kori 5	South Korea	1,340	Dec-24	4.4	3.3
Kursk II-1	Russia	1,255	Dec-25	3.8	3.0
Vogtle 4	US	1,250	May-24	15	12.0

Fuente: Tomado de [26].

El reporte Global Nuclear Energy Review 2024 de Rystad Energy [26], muestra una favorabilidad en costos de los reactores de generación III+ comparado con los tres diseños de generación III, que han tenido una serie de situaciones atípicas las cuales han incrementado enormemente sus costos y tiempos de construcción y no se pueden tomar como caso estándar, sin embargo han servido de lecciones aprendidas y premisas para los nuevos diseños de reactores de generación III+ y IV, las cuales se describen a continuación.

Los reactores Vogtle 3 y 4 [57] ubicados en Estados Unidos iniciaron construcción en el año 2009 con un presupuesto estimado de catorce (14) billones de dólares y un inicio de operación comercial en 2016 para Vogtle 3 y 2017 para Vogtle 4 [58]. En el 2023 inició operaciones Vogtle 3 y tan solo hasta abril de 2024 entró en operación el reactor Vogtle 4, luego de resolver unas situaciones regulatorias y asociadas a la licencia, las cuales ocasionaron los primeros retrasos. También hubo problemas de diseño al presentarse vibración en las tuberías de la torre de enfriamiento, lo que retrasó aún más el proyecto que presentó sobrecostos y su valor final ascendió a los 30 billones de dólares, capital invertido durante los 15 años que duró la construcción [57].

El reactor Flamanville 3, en Francia, se ha retrasado más de once años, lo que ha provocado unos sobrecostos altos y ha encarecido la central frente a otras centrales de generaciones posteriores.

El reactor nuclear Hinkley Point C en el Reino Unido, inició construcción en el 2018 y proyectaba iniciar operación a finales del 2025, pero una baja productividad en los trabajos electromecánicos y demoras en la retoma de actividades de construcción de la industria nuclear del Reino Unido que estuvo parada por más de veinte años, hace que las estimaciones indiquen una entrada en operación alrededor del 2030 [59].

En los nuevos diseños de reactores se refleja la optimización en los costos, materiales usados, seguridad pasiva y modularización, lo que ha mejorado las cadenas productivas y la duración de los materiales. Por ejemplo el reactor I-SMR desarrollado en Corea del Sur indica una vida útil de ochenta (80) años, tiempos de construcción menores a 42 meses para 4 módulos de 170 MWe cada uno, unos costos de inversión de MUSD\$3.5/MW y un costo nivelado de energía de USD\$65/MWh que es muy competitivo frente a otras fuentes de energía bajas en carbono, cuyas características se observan en la figura 25 [60] y confirma el rango de costos de construcción logrados con los reactores modernos y vistas anteriormente.



Figura 25. Características reactor I-SMR de Corea del Sur

Fuente: Tomado de [60].

4.13 Estado del arte en extracción de crudo con energía nuclear

El Departamento de Ingeniería y Ciencia Nuclear del Instituto tecnológico de Massachussets (MIT) en el año 2006 realizó un estudio sobre la tecnología nuclear y arenas bituminosas canadienses: Integración de la energía nuclear con la extracción de petróleo in situ para que la energía de un reactor nuclear reemplazara la energía obtenida del gas natural y usada en el proceso de extracción de petróleo de arenas bituminosas con tecnología de drenaje por

gravedad asistido por vapor (SAGD, siglas en inglés) [61]. Se analizaron tres escenarios para el uso del reactor: (1) utilizar el reactor para producir sólo el vapor necesario para el proceso SAGD; (2) utilizar el reactor para producir vapor así como energía eléctrica para las facilidades de arenas bituminosas; y (3) utilizar el reactor para producir vapor, electricidad e hidrógeno para mejorar el bitumen de las arenas bituminosas hasta crudo sintético, un material similar al petróleo convencional [61].

Los resultados del informe demuestran la economía, practicidad y viabilidad de la energía nuclear, para su uso en una facilidad de arenas bituminosas. También concluyen que la energía nuclear es entre dos y tres veces más barata que el gas natural en los tres escenarios analizados. Además, utilizando energía nuclear en lugar de gas natural, una planta que produjera 100.000 barriles de bitumen al día evitaría la emisión a la atmósfera de hasta 100 millones de toneladas de CO₂e/año.

En el estudio análisis técnico económico de pequeños reactores modulares para la extracción y mejora de arenas petrolíferas en Canadá del año 2024 del Laboratorio Nuclear Canadiense [62], se considera el uso de reactores PWR y PHWR para ser integrados en las instalaciones SAGD y producir vapor y energía eléctrica. El estudio demostró que cuando se utilizaba la energía nuclear para la generación de energía eléctrica, vapor y producción de hidrógeno, se lograba una reducción significativa del 91% de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como un aumento de la producción de las arenas bituminosas y la prolongación de la vida útil de los pozos petrolíferos mejorando la economía del campo petrolero [62].

Capítulo 5

METODOLOGÍA

Se hizo un análisis del estado del arte con corte a julio de 2024 en SMR, así como una revisión de la regulación en Colombia; posteriormente, se realizó un estudio de prefactibilidad para la implementación segura y pacífica de una central nuclear en Colombia. A continuación, se relaciona la metodología aplicada para el desarrollo de los objetivos:

5.1 Revisión del estado del arte a julio de 2024 en SMR

- Revisión de la literatura académica, informes técnicos y estudios de caso existentes sobre SMR.
- Identificar los últimos desarrollos tecnológicos, costos y aplicaciones prácticas de SMR en diferentes contextos a nivel mundial.
- Comparar las características de los SMR con tecnologías de generación fósiles.

5.2 Revisión de la regulación nuclear en Colombia

- Estudiar y compilar la normativa y regulaciones nucleares vigentes en Colombia.
- Comparar como estas regulaciones se alinean con las directrices internacionales, especialmente las del OIEA.
- Identificar posibles brechas o áreas de mejora en la legislación actual que podrían afectar la implementación de los SMR.

5.3 Identificación de requerimientos de regulación y normativas del OIEA

- Revisar y sintetizar los requisitos y normativas del OIEA relevantes para la implementación de los SMR.
- Identificar las necesidades de adaptación o actualización de la regulación local para cumplir con estos estándares internacionales.

5.4 Estudio de prefactibilidad técnica y económica

- Realizar un estudio de prefactibilidad técnica de la implementación de un SMR en un campo de producción de petróleo, incluyendo aspectos como diseño y capacidad.
- Evaluar la prefactibilidad económica mediante el análisis del costo-beneficio, incluyendo costos de construcción (CAPEX), operación, mantenimiento y desmantelamiento (OPEX) y compararlo con la generación usada en el campo petrolero.
- Registrar como la implementación de SMR contribuiría a la descarbonización de la matriz energética del campo petrolero.

5.5 Análisis de Integración de Sistemas para la Implementación de SMR

- Consultar modelos de simulación del fabricante seleccionado para determinar las necesidades de adaptación y la compatibilidad del SMR con los sistemas de distribución eléctrica existentes para evitar picos de carga que podrían comprometer su estabilidad.
- Identificar cómo la implementación del SMR puede mejorar la producción de energía del campo petrolero.

Capítulo 6

RESULTADOS

6.1 Marco normativo de regulación nuclear vigente en el país y requisitos y estándares establecidos por el OIEA.

Los avances regulatorios en SMR requieren un marco adaptativo que permita la rápida implementación de innovaciones en seguridad y operatividad. Un enfoque de regulación basado en el análisis probabilístico de riesgos permitirá a los organismos nacionales alinearse con las prácticas de países líderes en energía nuclear, garantizando que los SMR puedan operarse dentro de los parámetros de seguridad internacionales y optimizando sus tiempos de aprobación.

El análisis del marco normativo nacional en materia nuclear permitió identificar que Colombia posee una arquitectura legal parcialmente alineada con las directrices del OIEA. Se evidencian avances en aspectos como salvaguardias y responsabilidad civil, enmarcados en compromisos internacionales ratificados por el país, así como lineamientos generales sobre seguridad tecnológica en el contexto de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Radiológica. No obstante, se identifican vacíos regulatorios en temas como el licenciamiento específico de reactores modulares, la categorización del material nuclear y la infraestructura institucional para ejercer funciones de regulador independiente. Esta situación plantea la necesidad de desarrollar una hoja de ruta regulatoria que permita el eventual licenciamiento de SMR bajo estándares IAEA Safety Standards Series.

El Gobierno Nacional en virtud de la Ley 16 de 1960 [63] aprobó el “Estatuto del Organismo Internacional de Energía Atómica (O.I.E.A.)” [64], suscrito en la ciudad de Nueva York el 23 de octubre de 1956 [65], otorgando a Colombia la calidad de Estado Miembro de dicho organismo.

Por lo anterior, en Colombia se emitieron una serie de resoluciones en torno a la normatividad y regulación para el control y vigilancia del uso de fuentes radiactivas en el país, así:

- Resolución No. 181434 del 5 de diciembre de 2002: “Por la cual se adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica”, establece los requisitos mínimos que deben cumplir las personas naturales o jurídicas interesadas en acometer prácticas que consideran el uso de materiales radiactivos que causan exposición a las radiaciones ionizantes. Fue elaborado con fundamento en las Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra la

Radiación Ionizante y para la Seguridad de Fuentes de Radiación (Colección de Seguridad No. 115, OIEA, 1997) [66].

- Resolución No. 181289 del 6 de octubre de 2004: “Por la cual se establecen los requisitos para la prestación del servicio de dosimetría personal”, en la cual se determinan los requisitos para la obtención de la licencia para la prestación del servicio de dosimetría personal, toda vez que para cualquier trabajador ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes se debe llevar un sistema de medición de dosis [67].
- Resolución No. 181419 del 4 de noviembre de 2004: “Por la cual se reglamenta la expedición de la Licencia de Importación de Materiales Radiactivos”, establece el procedimiento para la expedición de dicha licencia con el fin de importar todo tipo de material radiactivos ya sea para uso médico, industrial, agrícola, veterinario, comercial, investigativo, docente u otros para su aplicación y uso en todo el territorio nacional [68].
- Resolución No. 181475 del 12 de noviembre de 2004: “Por la cual se expide el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y se establecen los requisitos para la obtención de licencias para su operación, parada prolongada, modificación y desmantelamiento”, que busca regular el sistema de licenciamiento para la operación de instalaciones nucleares en la República de Colombia [69].
- Resolución No. 181682 del 9 de diciembre de 2005: “Por la cual se adopta el Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos”, atendiendo la normativa del OIEA sobre el transporte y ajustándola a la normativa y necesidades del país, el cual será de cumplimiento mandatorio por parte de las personas naturales o jurídicas que, en cualquier rol, participen en el transporte de materiales radiactivos en Colombia [70].

El objetivo del reglamento es el de proteger a las personas, los bienes y el medio ambiente de los efectos de las radiaciones durante el transporte de materiales radiactivos, comprendiendo todas las modalidades de transporte por vía terrestre, acuática o aérea de materiales radiactivos, incluido el transporte incidentalmente asociado al uso de materiales radiactivos [70].

- Resolución No. 180052 del 21 de enero de 2008: “Por la cual se adopta el sistema de categorización de las fuentes radiactivas.”, en línea con la adhesión de la República de Colombia al “Código de Conducta sobre Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes de Radiación” y a las “Directrices sobre la Importación y Exportación de Fuentes Radiactivas”,

basado en el potencial de la radiación para afectar la salud humana, la cual proporciona una base técnica, armonizada globalmente, para la toma de decisiones relacionadas con el riesgo radiológico y instituye la metodología para dicha clasificación [71].

- Resolución No. 180005 del 5 de enero de 2010: “Por la cual se adopta el Reglamento para la gestión de desechos radiactivos en Colombia” [72], modificada y adicionada por medio de la Resolución No. 41178 del 2 de diciembre de 2016, en concordancia con la “Política para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia” [73], establece que dicho reglamento será de forzoso cumplimiento por parte de las personas naturales o jurídicas que, en cualquier rol, participen en la gestión de desechos radiactivos en Colombia, con el fin de garantizar la seguridad y protección del hombre y del medio ambiente en el presente y el futuro.

Un par de años después, se firma el Decreto 0381 del 16 de febrero de 2012 “Por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Minas y Energía” [74] en cuyo artículo 2, numeral 12, establece como función del Ministerio: “Formular la política nacional en materia de energía nuclear y de materiales radiactivos” [74, Art. 2]; en el artículo 5, numeral 1, dispone que es función del Despacho del Ministro de Minas y Energía: “Adoptar la política en materia de minas, energía eléctrica, energía nuclear, materiales radiactivos, fuentes alternas de energía, hidrocarburos y biocombustibles” [74, Art. 5]; y numeral 16 “Dictar las normas y reglamentos para la gestión segura de materiales nucleares y radiactivos en el país”; y, finalmente, en el artículo 14, numeral 10, dispone que es función del Despacho del Viceministro de Energía: “Asesorar al Ministro en la adopción de la política en materia de energía nuclear y de materiales radiactivos.” [74, p. 14].

Al siguiente año, se firma el Decreto 1617 de 2013 “Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 381 del 16 de febrero de 2012” [75], establece en su artículo 1, numeral 31, como función del Ministerio: “Ejercer la función de autoridad competente encargada de la aplicación del marco legislativo y reglamentario, así como de los tratados, acuerdos y convenios internacionales relacionados con el sector minero-energético y sobre seguridad nuclear, protección física, protección radiológica y salvaguardias.” [75, Art. 1]; y en su artículo 6, numerales 21, 22 y 23, dispone como funciones del Despacho del Viceministro de Energía: “Propender por la aplicación del marco legislativo y reglamentario, así como los tratados, acuerdos y convenios internacionales relacionados con el sector energético y sobre seguridad nuclear, protección física, protección radiológica y salvaguardias.” [75, Art. 6], “Autorizar la expedición, modificación, renovación,

suspensión o revocatoria de autorizaciones para las actividades relacionadas con la gestión segura de los materiales radiactivos y nucleares en el territorio nacional.”, y “Autorizar la realización de inspecciones programadas y de control, a las instalaciones que utilizan materiales radiactivos y nucleares, con una periodicidad establecida en correspondencia con el riesgo inherente a los mismos.” [75].

Un año más adelante, se emite la Resolución No. 90874 del 11 de agosto de 2014: “Por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas” [76], modificada por medio de la Resolución No. 41226 del 16 de diciembre de 2016 [77], establece los requisitos y los procedimientos aplicables que se deben cumplir para la obtención de los diferentes tipos de autorización, y se otorga al órgano regulador, o su entidad delegada, la potestad de vigilancia y control mediante inspecciones o auditorías regulatorias, para verificar las condiciones de protección radiológica y de seguridad física de las instalaciones, aplicable a todas las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, nacionales o extranjeras radicadas o con representación en el territorio nacional, que dentro de la jurisdicción de la República de Colombia realicen actividades que utilicen en sus actividades fuentes radiactivas.

En el año 2024, se expide la Resolución No. 40234 del 4 de julio de 2024: “Por la cual se establecen los requisitos para la seguridad física en el empleo de fuentes radiactivas de categoría 1, 2 y 3, y, se modifica parcialmente la Resolución 90874 de 2014” [76], con la cual se establecen los niveles de seguridad física de las fuentes radiactivas y los requisitos y procedimientos administrativos que deben cumplir las instalaciones en función de la categorización del material radiactivo [78], también se expide la Resolución 40306 de 2024, “Por medio de la cual se actualiza el Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos” [79], mostrando un claro compromiso por parte del Ministerio de Minas y Energía en actualizar su normativa en asuntos nucleares.

A nivel internacional hay legislación como se muestra en la figura 26 [80], el OIEA con más de 178 Estados Miembros, cuenta con el manual de derecho nuclear de 2006, que lo define como *“El conjunto de las disposiciones jurídicas especiales creadas para regular la conducta de las personas físicas o jurídicas que llevan a cabo actividades relacionadas con los materiales*

fisionables, la radiación ionizante y la exposición a fuentes naturales de radiación.” [80, p. 4]

Basado principalmente en dos componentes, nacional e internacional, así:

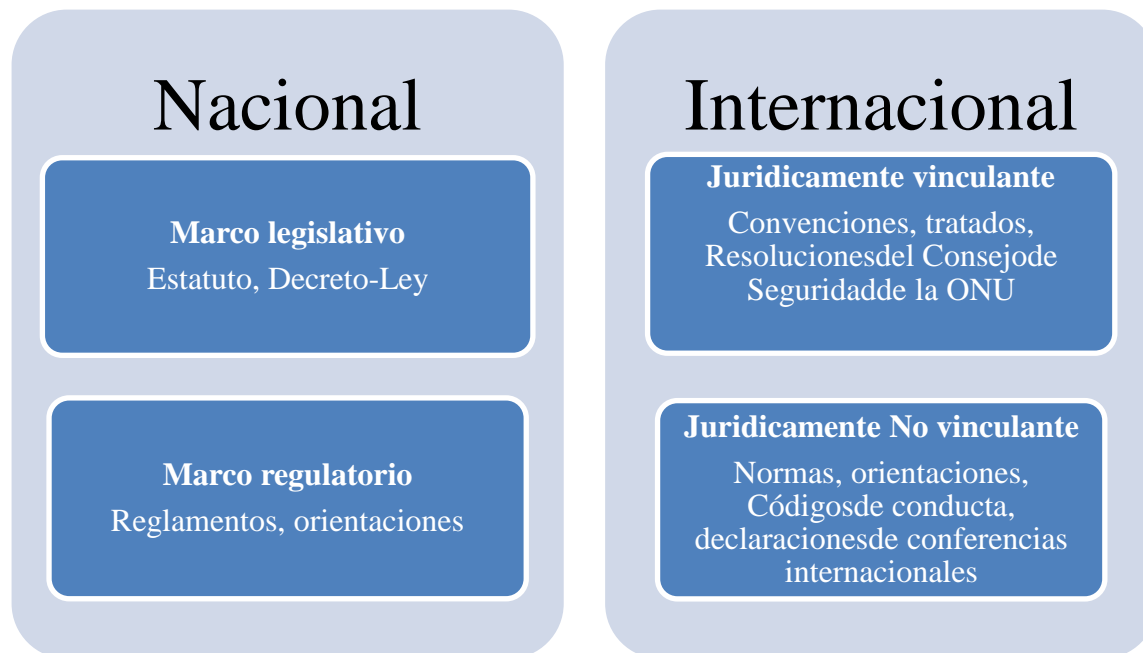


Figura 26. Componentes del derecho nuclear. Fuente: OIEA

Fuente: Tomado de [80].

Por otra parte, el OIEA tiene instrumentos jurídicos, estos son estrictos y están alineados con los estándares internacionales, asegurando que los reactores cumplan con los requisitos de calidad y seguridad antes de su integración y se relacionan en cuatro ámbitos, descritos a continuación:

6.1.1 Seguridad tecnológica

Hace referencia a la protección de las personas y el medio ambiente contra los peligros asociados a la tecnología, ejemplo exposición a las radiaciones ionizantes.

- Ley 766 de 2002 Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares, aprobada en septiembre de 1986, entró en vigor en octubre de 1986, a 2024 hay 134 estados parte [81].
- Ley 702 de 2001 Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica, aprobada en septiembre de 1986, entró en vigor en febrero de 1987, a 2024 hay 129 estados parte [82].

- Convención sobre seguridad nuclear aprobada en junio de 1994, entró en vigor en octubre de 1996, a 2024 hay 96 estados parte [83].
- Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos. Aprobada en septiembre 1997 entró en vigor en junio 2001, a 2024 hay 90 estados parte [84].
- Código de conducta sobre la seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas aprobada en septiembre de 2003, entró en vigor en enero de 2004, a 2024 hay 149 estados que expresaron su compromiso político [85].
- Código de Conducta sobre la Seguridad de los Reactores de Investigación, refrendado en 2004, no es jurídicamente vinculante, los estados pueden presentar compromiso político para aplicarlo [86].
- Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos. Edición 2018 [87].

6.1.2 Seguridad física

Hace énfasis en la prevención, detección y respuesta a actos delictivos o intencionales no autorizados que involucren materiales o instalaciones nucleares, incluye las medidas dedicadas a proteger el material nuclear o instalaciones, para impedir el acceso no autorizado a material nuclear, si retirada no autorizada o actos de sabotaje.

- Ley 728 de 2001 Convención sobre la protección física de los materiales nucleares, en vigor desde febrero de 1987, hay 164 estados parte.
- Ley 1572 de 2012 Enmienda de la Convención sobre la Protección Física de los materiales nucleares, en vigor desde mayo de 2016, hay 135 estados parte.
- Directrices de importación y exportación de fuentes radiactivas elaborada en el año 2004, a 2024 hay 135 estados que expresaron su compromiso político.
- Orientación sobre la gestión de las fuentes radiactivas en desuso, elaborada en septiembre de 2017, a 2024 hay 54 estados que expresaron su compromiso político.

6.1.3 Salvaguardias

Se enfoca en el conjunto de medidas técnicas aplicadas por el OIEA a materiales y actividades nucleares, por medio de las cuales, el OIEA verifica de manera independiente que las instalaciones nucleares no se usen de manera indebida ni que los materiales nucleares se desvíen de los usos pacíficos.

- Ley 47 de 1982 Acuerdo de salvaguardias amplias. En vigor con 181 estados incluyendo a Colombia (al 31 de diciembre de 2022) [88].
- Ley 1156 de 2007 Protocolos adicionales a los acuerdos de salvaguardias. En vigor con 140 estados (al 31 de diciembre de 2022) [89].

6.1.4 Responsabilidad civil por daños nucleares

Hace referencia a daños nucleares causados por un accidente nuclear, ya sea en una instalación nuclear o durante el transporte de material nuclear.

- Firmado 1963. Convención de Viena sobre responsabilidad civil por daños nucleares. hay 45 estados parte [90].
- Firmado 1997. Protocolo de Enmienda de la Convención de Viena sobre Responsabilidad civil por daños nucleares, hay 16 estados parte [91].
- Protocolo común relativo a la aplicación de la Convención de Viena y del Convenio de París, hay 34 estados parte [92].
- Convención sobre indemnización suplementaria por daños nucleares. Adoptada en septiembre de 1997 [93].
- Sistema común de principios.
- Normas mínimas de protección jurídica y financiera contra daños causados por los usos pacíficos de la energía nuclear (contexto transfronterizo).

Los elementos mencionados en los cuatro ámbitos anteriores se integran para obtener una legislación nuclear nacional integral y robusta, que asegure el uso seguro de los materiales radioactivos, defina las responsabilidades del órgano regulador, las obligaciones y derechos del titular de la licencia y el establecimiento de los mecanismos de compensación por daños nucleares, como se observa en la figura 27 [80].



Figura 27. Elementos de legislación nuclear nacional integral

Fuente: Tomado de [80].

En resumen, el OIEA recomienda que la legislación nuclear debe disponer el establecimiento de un órgano regulador independiente, dotado de la autoridad, competencia técnica necesaria y recursos humanos y financieros necesarios para ejercer de manera eficaz sus funciones de regulación y control, estos mecanismos sugieren el marco gubernamental, mostrado en la figura 28, en Colombia se están dando los primeros pasos y esto se puede evidenciar en el proyecto de ley radicado 466/2024: “...Por el cual se crea la Agencia Nacional de Seguridad Nuclear - ANSN y se establece el marco legislativo que regula las actividades que involucran el uso de las radiaciones ionizantes, los materiales nucleares y los materiales radiactivos en el territorio nacional...” [94].

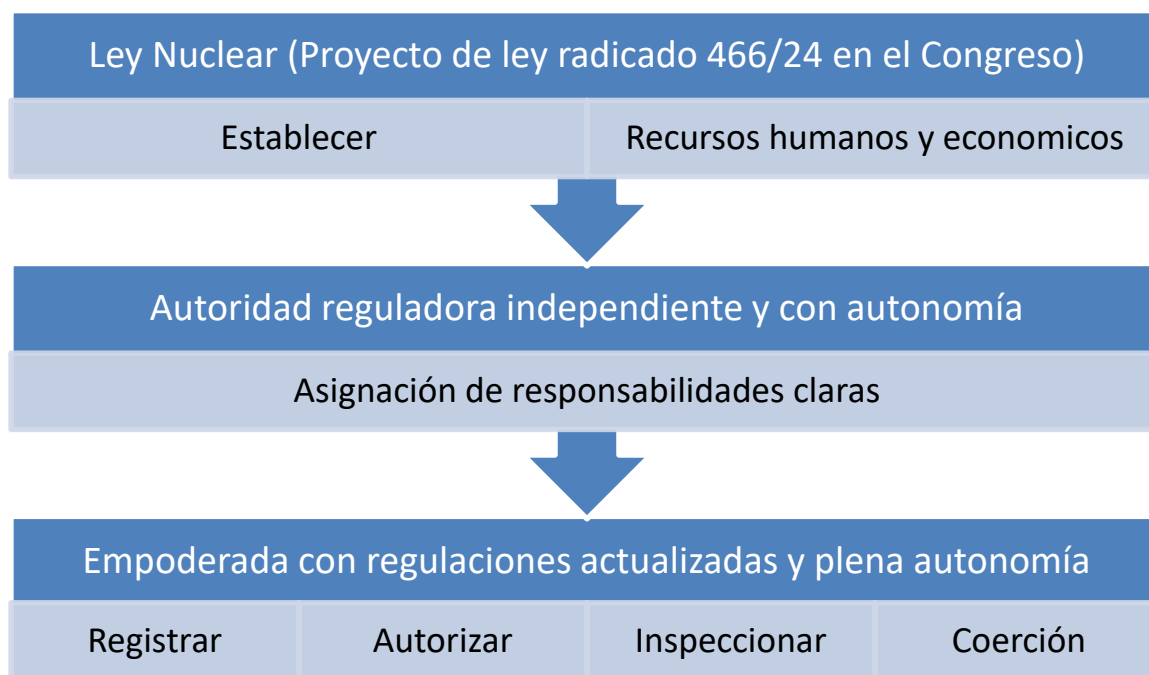


Figura 28. Marco Gubernamental del regulador

Fuente: Elaboración propia con información del MME.

6.2 Estudio de prefactibilidad técnica y económica para la implementación de un reactor modular pequeño (SMR) en un campo de producción de petróleo.

El estudio de prefactibilidad para la implementación de SMR en un campo de producción de petróleo combina un análisis técnico y económico, que fue organizado de la siguiente manera:

1. La prefactibilidad técnica se estimó a partir de la viabilidad del reactor seleccionado (Secciones 6.2.1 y 6.2.2), incluyendo aspectos como capacidad y los requisitos establecidos por la (OCDE/NEA) [35].
2. La prefactibilidad económica permitió cuantificar la inversión inicial y los costos operativos asociados (Sección 6.2.3). Este enfoque permitió establecer no solo la adaptabilidad tecnológica a la red eléctrica del campo de petróleo, sino también la sostenibilidad financiera del proyecto, alineándose con los compromisos de descarbonización (Sección 6.2.4).

Como parte del análisis de prefactibilidad, para evaluar el grado de desarrollo de los reactores modulares pequeños (SMR) se usaron las siguientes seis condiciones incorporadas en la valoración utilizada por la NEA/OCDE [35], lo cual primero, permite validar la madurez tecnológica de los SMR con el objetivo de generar confianza en su implementación y segundo identificar las barreras técnicas.

6.2.1 Valoración de la tecnología nuclear

Concesión de licencias: sigue de cerca las normas internacionales de concesión de licencias, incluidas, las interacciones previas a la concesión de licencias con los reguladores, la aprobación del diseño, la construcción y la expedición de licencias de explotación. Se concede una bonificación a los SMR con actividades de concesión de licencias en múltiples jurisdicciones a cualquier nivel.

La concesión de licencias para SMR implica una complejidad adicional debido a la naturaleza novedosa de su diseño y la falta de precedentes regulatorios en muchas jurisdicciones. Los SMR requieren un marco regulatorio que contemple su operación modular, los sistemas de seguridad pasiva y la posibilidad de configuraciones multi-módulo que interactúan en red. Además, la regulación debe adaptarse a la evaluación de ciclos de vida operacionales más

prolongados y a la certificación de procesos de reprocesamiento in-situ del combustible, aspectos críticos que determinan la viabilidad económica y operativa de estas tecnologías. La implementación de estos aspectos en el marco normativo es esencial para la aceptación y seguridad de los SMR en la industria energética.

Emplazamiento: Evalúa las decisiones adoptadas por los propietarios de sitios potenciales y considera el grado de preparación de estos para la construcción de reactores SMR. Se concede una bonificación independiente a su fase de desarrollo, a las tecnologías de SMR que demuestren avances simultáneos en múltiples emplazamientos a cualquier nivel.

Financiación: refleja tanto los anuncios públicos de los diseñadores de reactores como los informes de financiación de fuentes públicamente disponibles.

Cadena de suministro: considera niveles crecientes de compromiso reflejados en memorandos de entendimiento, contratos vinculantes y asociaciones formales, empresas conjuntas o consorcios con proveedores o empresas de ingeniería, adquisiciones y construcción.

La cadena de suministro para SMR debe ser altamente especializada y contar con capacidades de manufactura de componentes modulares que puedan transportarse e instalarse rápidamente en sitio. Dado que los SMR requieren tolerancias precisas y materiales avanzados capaces de soportar condiciones extremas de operación. La logística debe integrar técnicas de manufactura de alta precisión y sistemas de control de calidad bajo normas internacionales estrictas. La cooperación entre proveedores y el cumplimiento de certificaciones nucleares internacionales son esenciales para asegurar que los módulos cumplen con los criterios de seguridad y desempeño necesarios para la operación continua y segura de los SMR en entornos industriales complejos.

Compromiso: refleja el número de compromisos con las personas y comunidades asociadas al proyecto SMR, evidenciados por memorandos de entendimiento, respaldos, reuniones municipales o acuerdos de reparto de beneficios.

El compromiso comunitario es esencial para la aceptación de los SMR en entornos industriales y urbanos. La implementación de programas de sensibilización y la transparencia en la comunicación de riesgos y beneficios pueden mejorar significativamente la percepción pública y el apoyo a largo plazo para proyectos nucleares.

Combustible: se basa en los avances hacia el suministro comercial de combustible cualificado. Una vez que existe una instalación autorizada y operativa para la fabricación de combustible, éste se tiene en cuenta junto con otros que ya se utilizan en centrales en funcionamiento. Para los SMR en este nivel de madurez, las siguientes etapas incluyen contratos para el suministro de combustible y una licencia para operar el reactor con el combustible específico [35].

Se realizó un análisis comparativo de las seis condiciones, según la valoración utilizada por la NEA/OCDE [35], en los modelos SMR con mayor nivel de madurez tecnológica, presentado en la figura 29 [35].

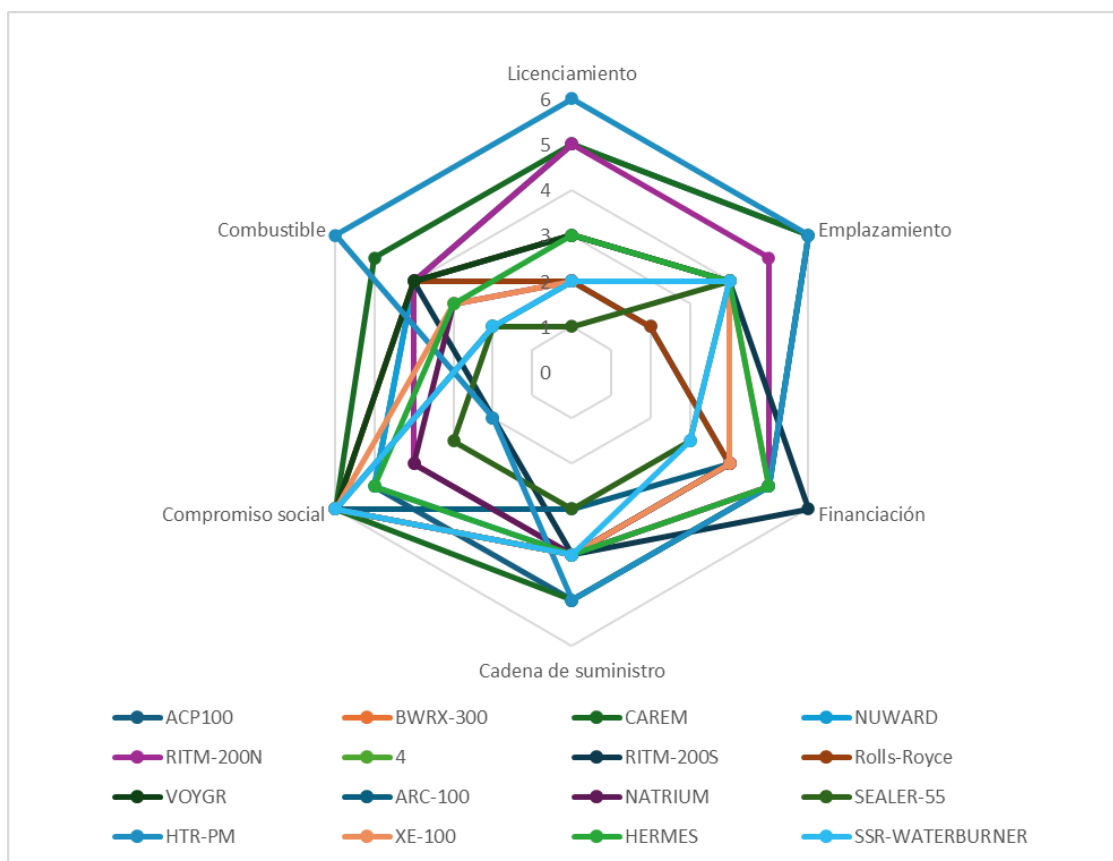


Figura 29. Comparativo de reactores con mayor madurez tecnológica

Fuente: Elaboración propia con información de NEA/OCDE [35].

6.2.2 Reactor seleccionado

Conforme a la valoración realizada en el numeral anterior, se escogió el modelo de reactor VOYGR® de Nuscale [95] para sustituir 50 MW de demanda de energía del campo petrolero mostrado en el capítulo 3, atendidos por una fuente fósil.

La Tabla 3 resume las especificaciones del SMR reactor VOYGR® - Nuscale: 77 MWe/módulo seleccionado [95], cuya eficiencia es mayor a 30%, tiene una vida útil de 60 años y se ajusta a la necesidad energética del campo petrolero, el cual requiere energía de manera continua, también se seleccionó porque su valoración indica que tiene un grado de madurez alto dada su aprobación para construcción en abril de 2024, por parte de la comisión reguladora nuclear de Estados Unidos.

Tabla 3. Características reactor Nuscale seleccionado.

Salida Eléctrica	77 MWe por módulo
Potencia del reactor	250 MWt por módulo
Temperatura de salida	321 °C
Vida útil de diseño	60 años
Tipo de Combustible	<4.95% UO ₂ enriquecido
Tipo de reactor	Reactor integral de Agua presurizada
Eficiencia Térmica	>30%
Refrigerante	Agua ligera

Fuente: Nuscale Small Modular reactor [95].

La elección del reactor VOYGR® responde no solo a sus características de generación continua, sino a su capacidad de modulación en entornos de alta demanda industrial. Este reactor incorpora mecanismos de seguridad pasiva y una integración optimizada de sus módulos, cuya estructura se muestra en la figura 30 [83], que permite alcanzar altos niveles de eficiencia térmica (>30%) en entornos de operación prolongada.

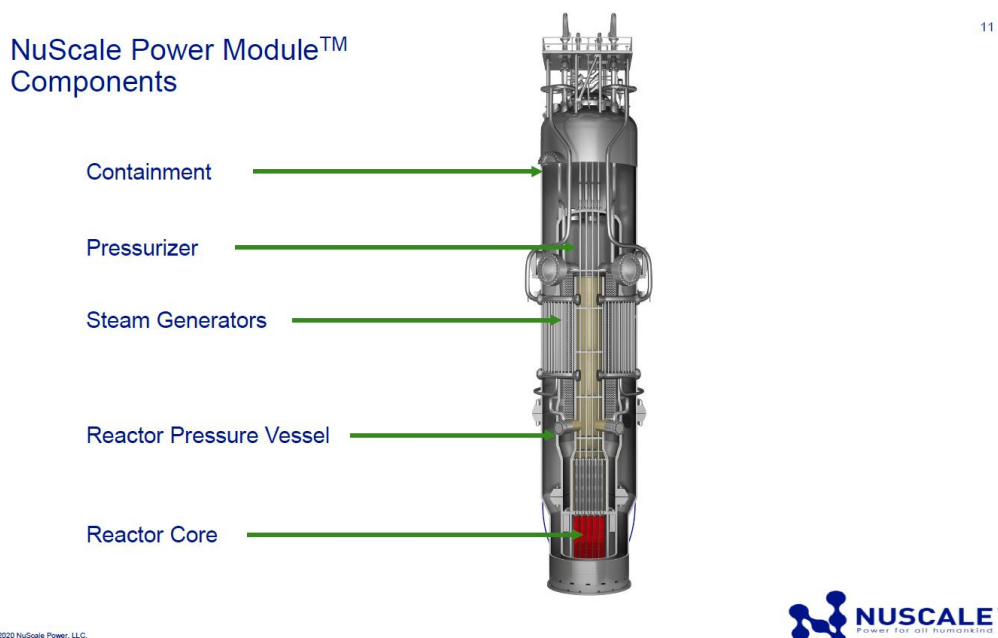


Figura 30. Partes principales del módulo Nuscale.

Fuente: Tomado de [96].

Estas características de diseño minimizan los costos de mantenimiento, optimizan la vida útil del combustible y facilitan su adaptación a sistemas híbridos de generación renovable. Esta modularidad también permite una reducción significativa en los tiempos de instalación y una mejora en la resiliencia de la matriz energética [96].

6.2.3 Inversión inicial módulo

Para el módulo de 77 MWe – Nuscale escogido, del cual se espera que opere con una potencia superior a los 50 MWe, se estimó una inversión total aproximada de MUSD\$308.47 a lo largo de diez años comprendidos entre 2027 y 2037, tal como se muestra en la figura 31. El análisis económico incluyó la pre-construcción, ingeniería detallada, construcción, gerenciamiento, contingencias, puesta en marcha, costos de construcción de instalaciones y costos financieros.

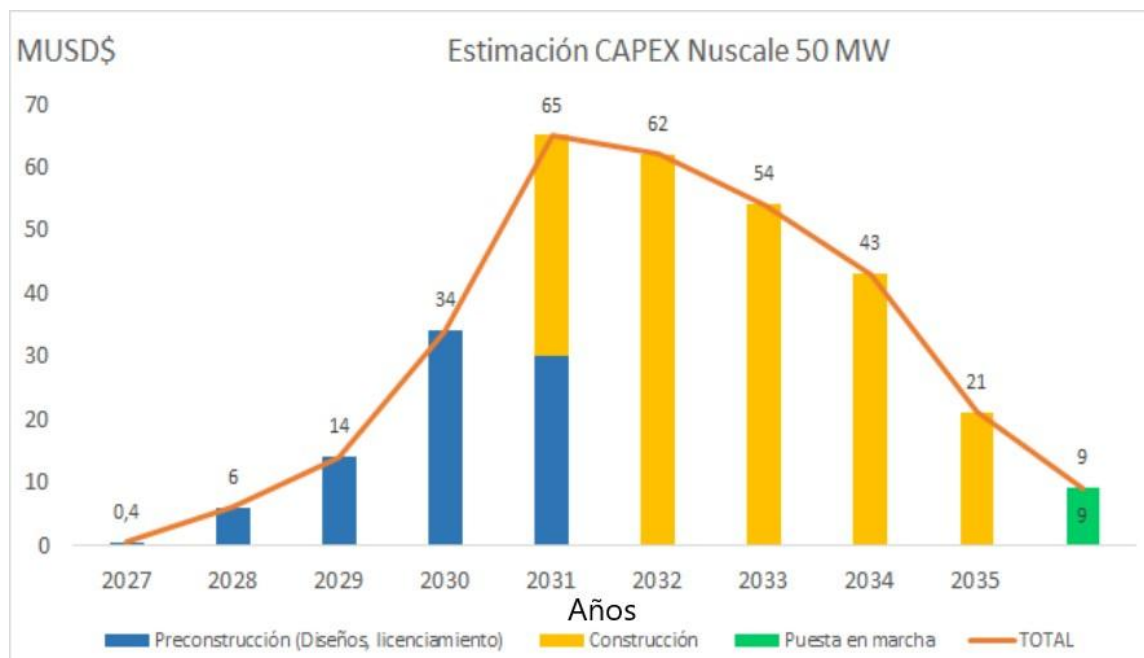


Figura 31. Estimación inversión SMR 77 MWe

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el comparativo de variables asociadas a la generación con combustible fósil (diésel) y la generación con SMR, mostrados en la tabla 4, donde se observa que hay una valoración económica negativa para aquellas tecnologías altas en emisiones de CO₂ y su modelo económico se ve castigado con USD\$30/Ton CO₂. Este esquema, incentiva el uso de tecnologías bajas en emisiones en los nuevos proyectos y en el caso de SMR le da un bono de MUSD\$6,6. También, se observa un ahorro de MUSD\$38/año por diferencia de tarifa de energía y una opción de negocio de poder comercializar el diésel y el petróleo usado para la generación de energía por un valor de venta de MUSD\$18/año. Sumando estos beneficios se alcanza un ahorro anual de MUSD\$62.65 con un periodo de retorno de la inversión de cinco años.

El modelo de costo nivelado de energía (LCOE) aplicable a cualquier tecnología de generación [32], presenta una ventaja competitiva clara para los SMR en comparación con los sistemas diésel convencionales, particularmente cuando se consideran los costos sociales y ambientales asociados a las emisiones de carbono. Este análisis, que integra costos de construcción, mantenimiento y disposición final del reactor, revela una superioridad económica en escenarios de alta demanda continua. Los SMR, al operar en ciclos prolongados de mantenimiento

y baja rotación de combustible, optimizan los costos de operación y aseguran un suministro estable y escalable de energía sin dependencia de factores estacionales. Además, el ahorro en externalidades negativas, como las emisiones de CO₂ y SO_x (reducción estimada en 88%), se traduce en beneficios directos para la región al reducir la necesidad de compensaciones ambientales y mejorar los indicadores de salud pública. Además, en operación a largo plazo, se incluyen los costos de almacenamiento y disposición final del combustible nuclear gastado. En consecuencia, si hay una tecnología con mayor quemado del combustible se podrían eventualmente reducir sus costos.

Tabla 4. Comparativo económico Diesel y SMR.

Variable Evaluada	Primer año Diesel	Primer año SMR
Producción de Energía (MWh)/año	438.000	674.520
Emisiones estimadas (TON CO _{2e})/año	220.752	26.490
Reducción precio sombra (MUSD)	0	\$6.62
Costo nivelado de energía LCOE (USD/MWh)	210	80
Capacidad de Generación Nominal (MWe)	50	77
Factor de planta Nominal	0.86	0.92
Energía Generada (MWh)	376.680	620.558
Costo de Energía Generada (MUSD)	\$91.98	\$53.96
Consumo de crudo (BOPD)	534.725	0
Consumo de fuel Oil #4 (BPD)	49.275	0
Margen de venta de crudo (MUSD/BLS) @30 USD/BL	0	\$16.04
Margen de venta de Fuel Oil #4 (MUSD/BLS) @40 USD/BL	0	\$1.97
Inversión inicial SMR (MUSD)		\$308
Beneficio Anual (MUSD)		\$62.65
Retorno de la inversión (años)		4.92

Fuente: Elaboración propia con información del campo y de Nuscale.

6.2.4 Compromisos mundiales de descarbonización a través de energía nuclear

En diciembre de 2023, dentro de la COP28, Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas celebrada en Dubai, 22 países de cuatro continentes se han comprometido a triplicar la potencia nuclear instalada desde el año 2023 al año 2050 [97].

Bulgaria, Canadá, Corea del Sur, Emiratos Árabes Unidos, Eslovaquia, Eslovenia, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Ghana, Hungría, Japón, Marruecos, Moldavia, Mongolia, Países Bajos, Polonia, Rumanía, Reino Unido, República Checa, Suecia y Ucrania, reconocen el papel clave de la energía nuclear en conseguir un balance neto de cero emisiones de gases de efecto invernadero en ese horizonte y en alcanzar el objetivo de limitar el incremento global de la temperatura a finales de siglo en 1,5 °C respecto a los niveles industriales [97] [85].

De los países que se comprometieron a triplicar su potencia nuclear instalada, se resalta que hay países como Bulgaria, Marruecos, Ghana y Hungría, entre otros, con menor producto interno bruto (PIB) que el de Colombia estimado en 363,5 billones de dólares para el año 2023, según datos del banco mundial [98]; no se trata de solo países ricos o del G8, sino de acciones certeras con la descarbonización mundial para restringir el aumento de la temperatura global a menos de 1,5°C a 2050, facilitar el acceso a energía y complementar el creciente ingreso de energías renovables. Con corte a junio de 2024 hay 50 países que tienen interés en incorporar energía nuclear en su matriz energética, de esos, 27 están en diferentes fases de incorporar su programa nuclear como se muestra en la figura 32 [27].



Figura 32. Países en fase de incorporar programa nuclear.

Fuente: Tomado de [27].

En la primera Cumbre sobre Energía Nuclear, realizada en marzo de 2024 en Bruselas, la presidenta de la Comisión Europea, Ursula von der Leyen expresó “El análisis del OIEA nos dice que las inversiones deben acelerarse en esta década y alcanzar nuevas cotas en el decenio de 2030 para cumplir los objetivos del Acuerdo de París. Para ello, es necesario el apoyo de los gobiernos, a fin de garantizar la disponibilidad de financiación y que la contribución de la energía nuclear a la seguridad eléctrica se valore y remunere como corresponde” [99].

La reunión de la COP 29, celebrada en Bakú (Azerbaiyán) del 11 al 22 de noviembre de 2024, se centró en acordar un nuevo objetivo de financiación para el clima. En la actualidad, los países desarrollados se han comprometido a aportar cien mil millones de dólares (MUSD\$100.000) anuales de financiación climática a partir de 2020 a los países en desarrollo, aunque los primeros cien mil millones (MUSD\$100.000) no se aportaron hasta 2024 [69].

En un acto, coorganizado por la presidencia de Azerbaiyán, el Departamento de Energía (DOE, siglas en inglés) de EE.UU., la Asociación Nuclear Mundial (WNA, siglas en inglés) y el OIEA, seis países se sumaron a la declaración para triplicar la capacidad nuclear en 2050, Los seis nuevos países fueron El Salvador, Kazajistán, Kenia, Kosovo, Nigeria y Turquía.

En la COP29 también se firmaron acuerdos bilaterales sobre energía nuclear entre EE.UU. y Ucrania sobre el desarrollo de reactores modulares pequeños (SMR), EE.UU. y el Reino Unido sobre reactores de IV Generación, así como entre Canadá, Rumanía y EE.UU. sobre nuevos reactores grandes [100].

6.3 Comportamiento de la potencia del reactor ante eventos transitorios

Este análisis es esencial para demostrar que el reactor no solo es seguro en su ingeniería, sino que con las condiciones de carga del campo petrolero también lo es. Se verifica que el reactor opera con altos estándares de seguridad al servicio de la industria petrolera, garantizando un apagado rápido y seguro del reactor ante diferentes modos de falla que se puedan presentar.

En la verificación de los documentos publicados y aprobados para construcción [1] por el regulador, que en el caso de Estados Unidos es la Comisión de Regulación Nuclear (NRC), se incluyeron las simulaciones presentadas por el fabricante Nuscale en la aplicación de la certificación del diseño por parte del ente regulador, cuyo diseño fue aprobado la NRC y fueron realizadas por el mismo fabricante del reactor, conforme a los principales eventos transitorios que puedan afectar la potencia entregada por el reactor. A continuación, se muestra los potenciales eventos (perturbaciones y situaciones operacionales) considerados en las bases de diseño, los cuales pueden incidir en el comportamiento de la potencia del reactor.

Los eventos seleccionados se comentarán en cada figura para identificar el origen de la perturbación y el tiempo de respuesta del control de la potencia del reactor ante cada tipo de evento simulado por el fabricante.

Disminución de la temperatura del agua de alimentación: provoca la reducción del volumen del refrigerante primario, lo que reduce inicialmente la presión del RCS. Sin embargo, a medida que aumenta la potencia del núcleo, la presión del RCS comienza a aumentar. La temperatura del tramo caliente aumenta en respuesta al incremento de potencia del reactor. El

límite de alta temperatura del reactor se alcanza a los 184 segundos del transitorio. Durante el supuesto retardo de la señal de disparo del reactor, el aumento de la potencia del reactor inicia un disparo del reactor de alta potencia aproximadamente a los 187 segundos del transitorio, ver figura 33.

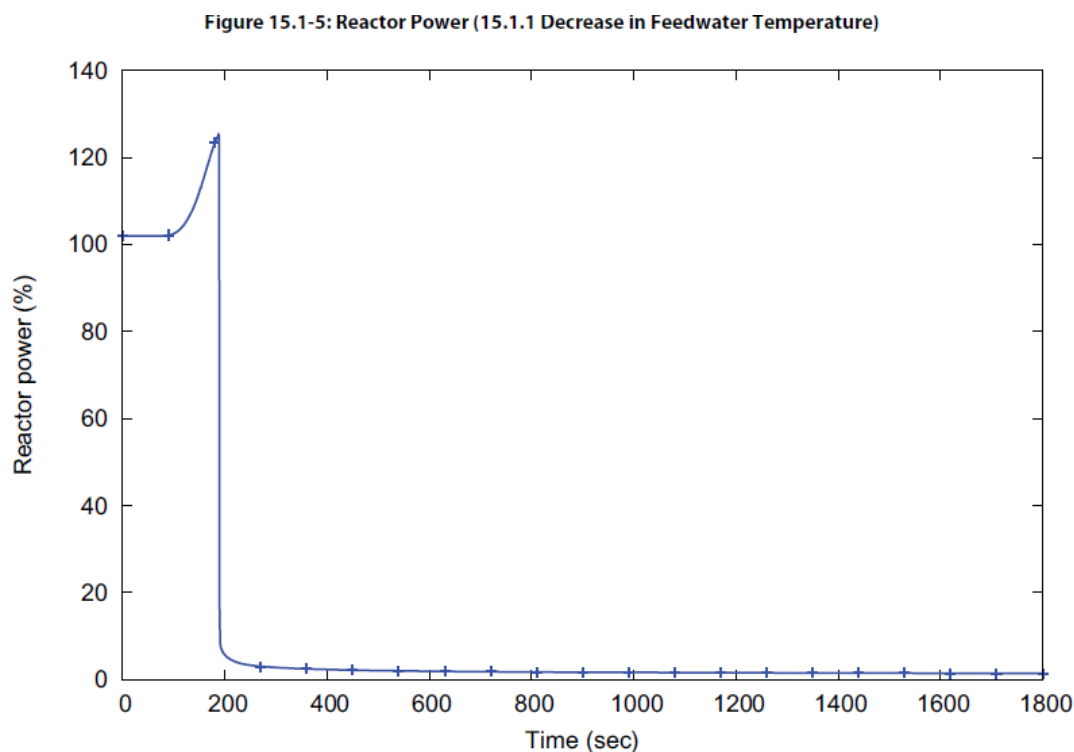


Figura 33. Potencia reactor - disminución de la temperatura del agua de alimentación

Fuente: Tomado de [1, p. 163]

Aumento del flujo de agua de alimentación: provoca un sobre enfriamiento imprevisto del RCS. El consiguiente descenso de la temperatura del RCS aumenta la reactividad del núcleo debido a la realimentación del moderador, lo que eleva la potencia del reactor por encima del 120% como se observa en la figura 34. La disminución de la temperatura media del RCS también provocará que el controlador retire el banco regulador del núcleo si está activado el control automático. La presión en los sistemas de refrigeración del reactor y de vapor principal debe mantenerse por debajo del 110% de los valores de diseño.

Figure 15.1-15: Reactor Power (15.1.2 Increase in Feedwater Flow)

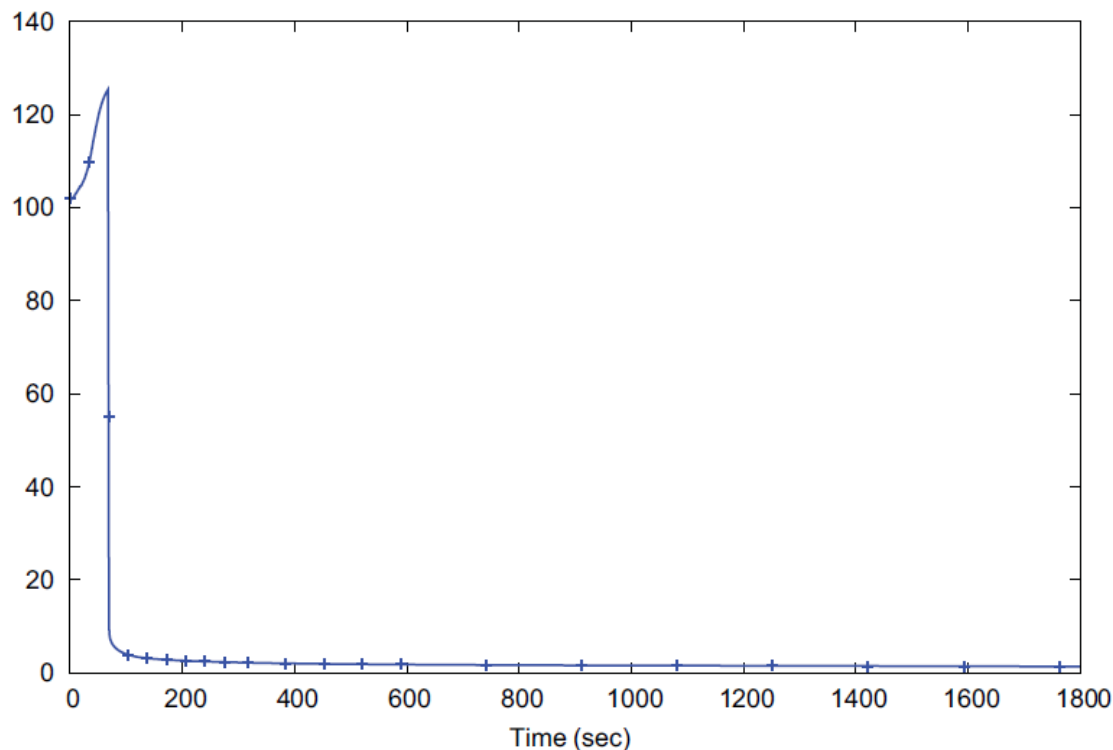


Figura 34. Potencia reactor - aumento del flujo de agua de alimentación

Fuente: Tomado de [1, p. 173]

Aumento del flujo de vapor: incrementa la eliminación de calor del sistema secundario, lo que genera una disminución de la temperatura del RCS. En respuesta, el controlador del banco de regulación retira el banco de regulación para compensar la realimentación positiva del moderador, y la potencia del reactor aumenta. Como la potencia y la temperatura de salida del núcleo aumentan, disminuye el límite del flujo crítico de calor (CHF) y se hace un apagado seguro del reactor en menos de 100 segundos como se visualiza en la figura 35.

Figure 15.1-26: Reactor Power (15.1.3 Increase in Steam Flow)

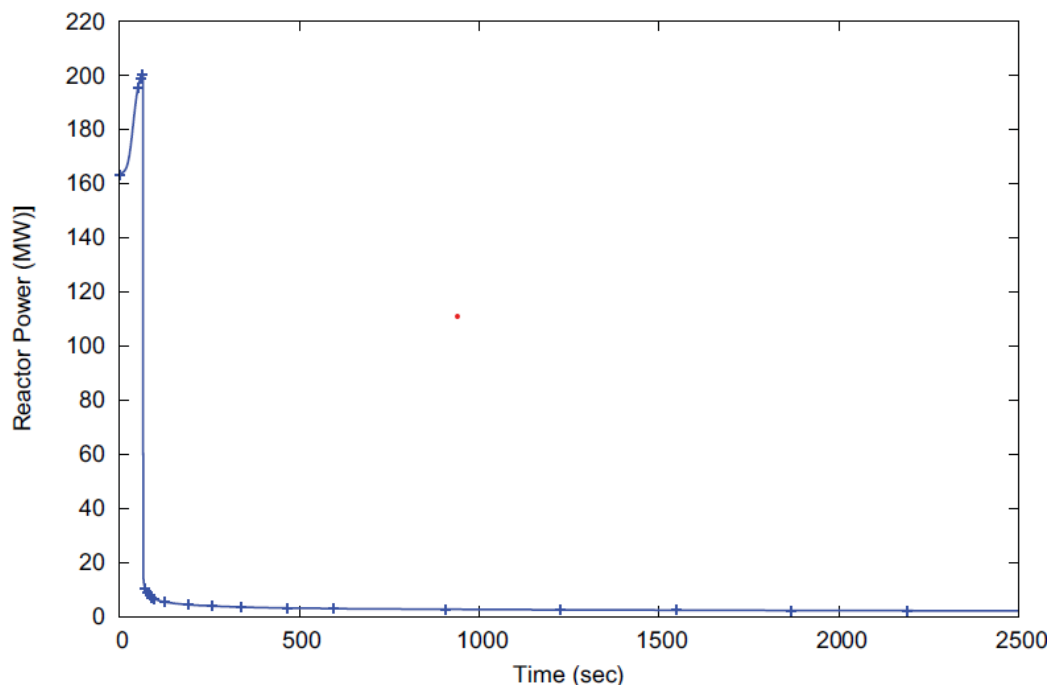


Figura 35. Potencia reactor - aumento del flujo de vapor

Fuente: Tomado de [1, p. 184]

Falla tubería de vapor limitando la presión del sistema de enfriamiento del reactor.

Debido a la realimentación de reactividad del sistema de enfriamiento, la potencia del núcleo aumenta a 121% y se mantiene en ese nivel hasta que se agota el agua de alimentación. La presión del sistema de enfriamiento del reactor (RCS) permanece por debajo del punto de disparo de la válvula de seguridad del reactor (RSV). Este escenario reta la capacidad de transición de la refrigeración del sistema de eliminación del calor de decaimiento (DHRS) en el generador de vapor (SG) tras una pérdida total de agua de alimentación después de un funcionamiento sostenido a muy alta potencia del reactor. Los resultados del análisis muestran que queda suficiente condensado en el brazo intacto SG/DHRS tras el aislamiento secundario para que el DHRS del generador de vapor (SG), establezca la refrigeración del núcleo y la eliminación efectiva del calor de decaimiento.

Una vez activado el DHRS, la eliminación de calor en el lado del vapor está limitada por el condensador del DHRS. Esto provoca una presurización del lado secundario. Esta presurización es una función esperada del accionamiento del DHRS, y no una consecuencia directa del accidente de rotura de la tubería de vapor.

La falla de la válvula de aislamiento de vapor principal (MSIV) provoca un estado más grave de la planta al liberar más masa a través de la rotura. También provoca una mayor carga térmica en el segmento intacto del DHRS. La falla de la válvula de aislamiento de vapor principal (MSIV) podría no limitar la presión del RCS al permitir un mayor flujo de vapor para la refrigeración. Sin embargo, la falla de la MSIV tiene poco efecto sobre la presión del RCS porque la línea de vapor fallada ya está casi vacía en el momento del accionamiento del DHRS.

Los resultados del análisis muestran que el DHRS inicia y proporciona la eliminación de calor durante una rotura de la línea de vapor (SLB), ver comportamiento figura 36, asegurando que los criterios de aceptación no sean excedidos.

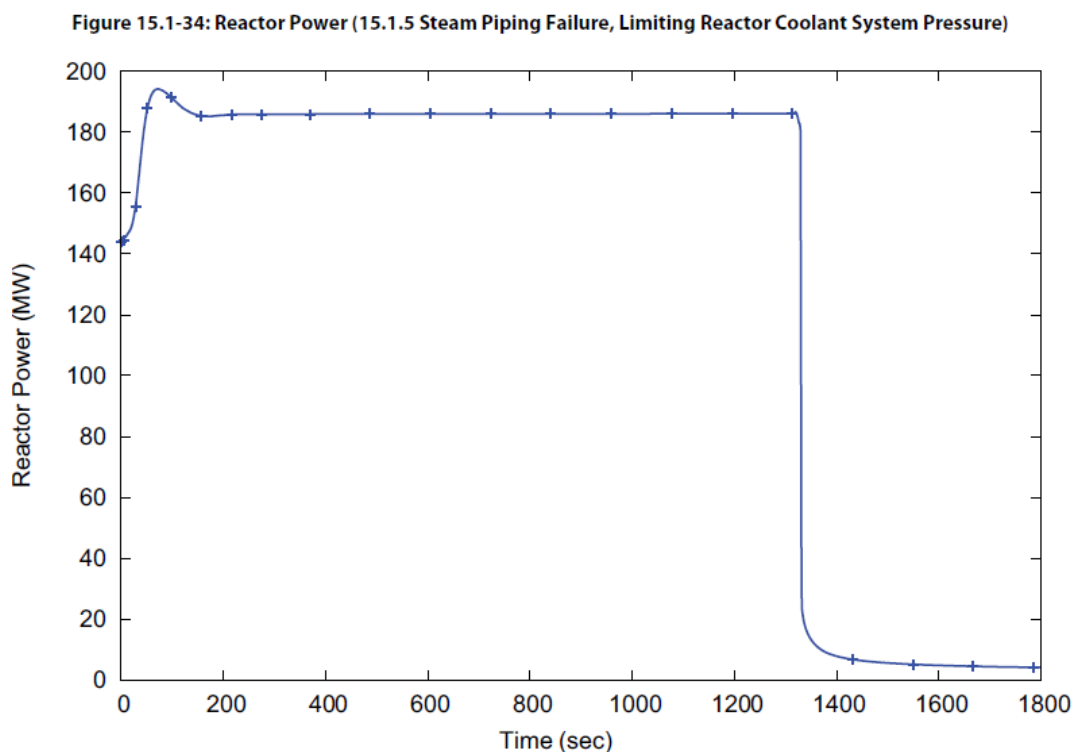


Figura 36. Potencia reactor - Falla tubería de vapor limitando la presión del sistema de enfriamiento

Fuente: Tomado de [1, p. 192]

Rotura de línea de vapor (SLB) limitando la relación mínima de flujo de calor crítico (MCHFR): hace que la potencia del núcleo aumente y alcance una nueva condición estable sin

disparo del reactor o aislamiento secundario. El agua de alimentación se interrumpe debido al supuesto agotamiento del inventario del pozo caliente después de que se hayan perdido 50.000 lbm de vapor a través de la rotura, causando calentamiento y presurización adicional del RCS después de que el reactor haya alcanzado condiciones muy por encima de la potencia nominal. La terminación del agua de alimentación provoca un disparo del reactor por baja presión de vapor, como se observa la figura 37. Este escenario da lugar a la presión más alta del sistema de enfriamiento del reactor (RCS) para los casos de falla de las tuberías de vapor.

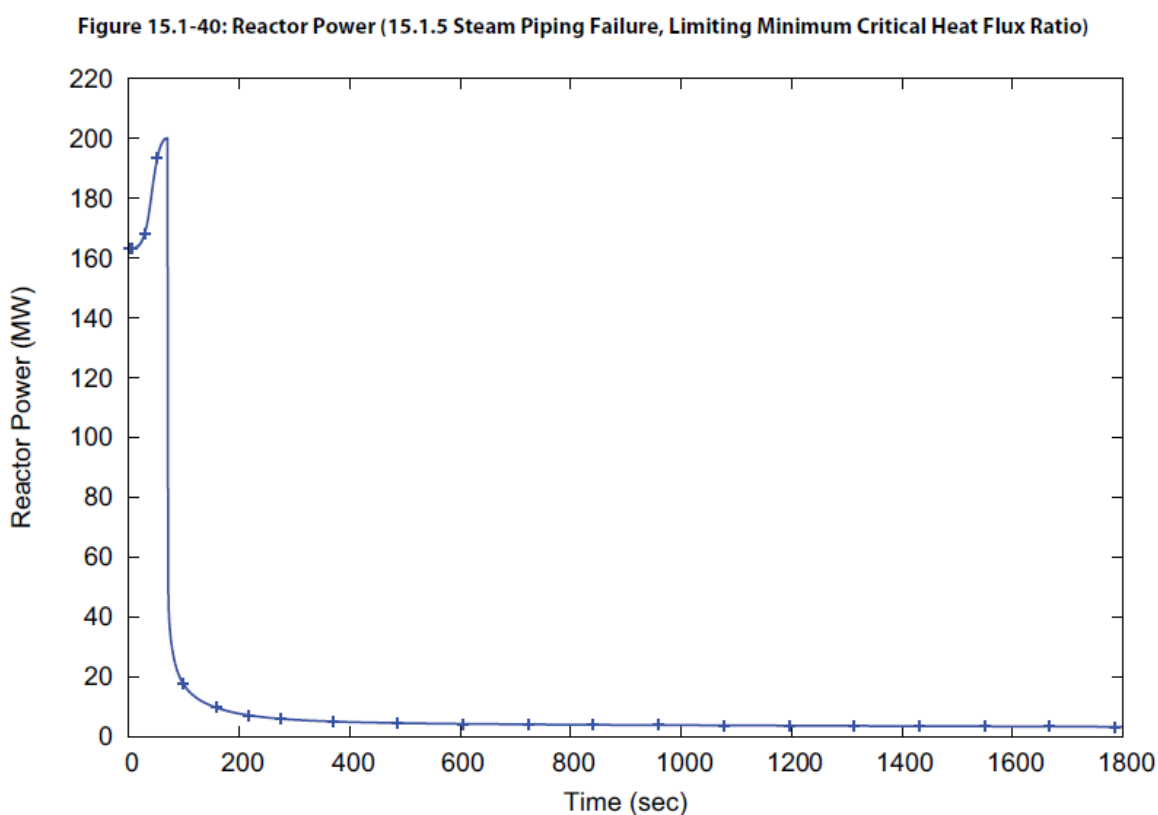


Figura 37. Potencia reactor - Falla tubería de vapor limitando la relación mínima de flujo de calor crítico (MCHFR)

Fuente: Tomado de [1, p. 198]

Inundación de la vasija de contención: se inicia por la rotura de una línea del sistema de accionamiento de la barra de control (CRDS) que conduce el agua de refrigeración de los componentes del reactor (RCCW) al interior de la vasija de contención (CNV). Cuando el fluido

del RCCWS entra en la contención, se produce un aumento inicial de la presión de la contención debido al fluido y a una pequeña cantidad de generación de vapor debido a la menor presión dentro de la contención en relación con la presión del fluido del RCCWS. Este aumento de la presión de contención provoca que el sistema de evacuación de la contención (CES) bombee vapor fuera de la vasija de contención (CNV) para mantener la presión de contención. Esto retrasa la presión de contención para que alcance el límite de alta presión de contención, lo que provoca una desconexión del reactor y pone fin al evento, como se ve en la figura 38. El fluido restante del RCCWS entra en la contención, elevando el nivel de líquido en la vasija de contención (CNV) hasta un nivel que permite que el fluido reemplace el espacio entre la presión de la vasija del reactor (RPV) y las paredes de la vasija de contención (CNV). El fluido permite un aumento de la transferencia de calor de la vasija del reactor (RPV) a la vasija de contención (CNV).

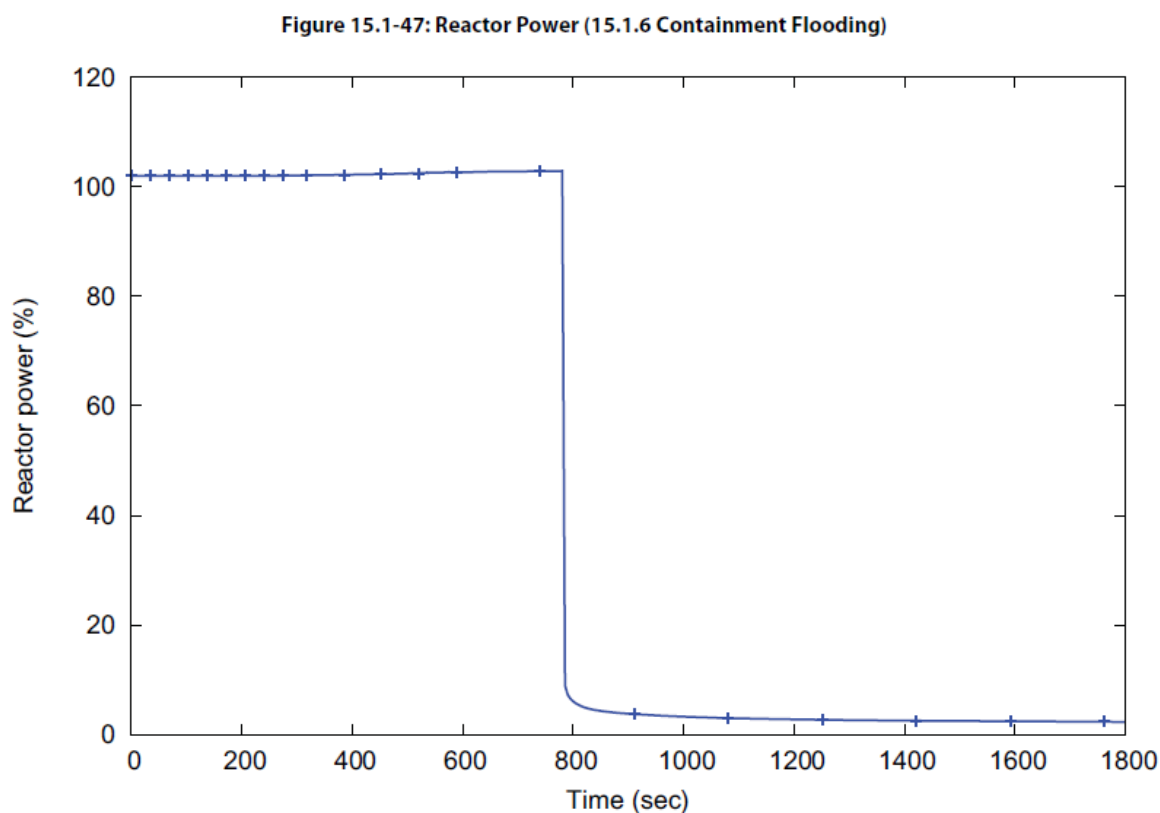


Figura 38. Potencia reactor - inundación de la vasija de contención

Fuente: Tomado de [1, p. 205]

Presión pico del sistema de refrigeración del reactor (RCS): se puede presentar principalmente por tres factores: la pérdida de carga externa, el disparo de la turbina y la pérdida de vacío del condensador (LOEL, TT y LOCV), estos eventos produjeron respuestas esencialmente idénticas para el sistema primario y secundario y la relación mínima de flujo de calor crítico (MCHFR). Al dispararse el reactor, la potencia disminuye.

La gravedad de un evento de pérdida de carga externa (LOEL) viene dictada por el tiempo que tarda el sistema de eliminación del calor de decaimiento (DHRS) en iniciar y establecer una velocidad de enfriamiento estable. La presión secundaria es impulsada inicialmente por la velocidad de cierre de las válvulas de control de la turbina. Sin embargo, tras el cierre de las válvulas, la presión secundaria sigue aumentando hasta que el DHRS establece la circulación natural. El DHRS establece el enfriamiento y comienza a despresurizar el generador de vapor (SG) y el sistema de enfriamiento del reactor (RCS) aproximadamente a los ochenta (80) segundos del evento.

Una pérdida de vacío del condensador (LOCV) es una perturbación que provoca un aumento de la presión del condensador debido a una fuga de aire o a una reducción de la refrigeración del condensador. Para el diseño del módulo de potencia, el efecto de una pérdida de vacío del condensador se traduce en una desconexión del turbogenerador y una pérdida de flujo de agua de alimentación, lo que provoca un aumento de la presión y temperatura del lado primario porque no se está extrayendo energía a través de los generadores de vapor hacia el condensador. El reactor se dispara por la alta presión del presurizador o la alta presión de la línea de vapor, reduciendo la potencia a niveles de calor de decaimiento como se ve en la figura 39. El sistema de eliminación del calor de decaimiento (DHRS) y el sistema de aislamiento secundario (SSI) se activan para aislar los sistemas de vapor y agua de alimentación y transferir el calor de decaimiento a la piscina del reactor.

Figure 15.2-2: Reactor Power - Peak RCS Pressure Case (15.2.1-15.2.3 LOEL-TT-LOCV)

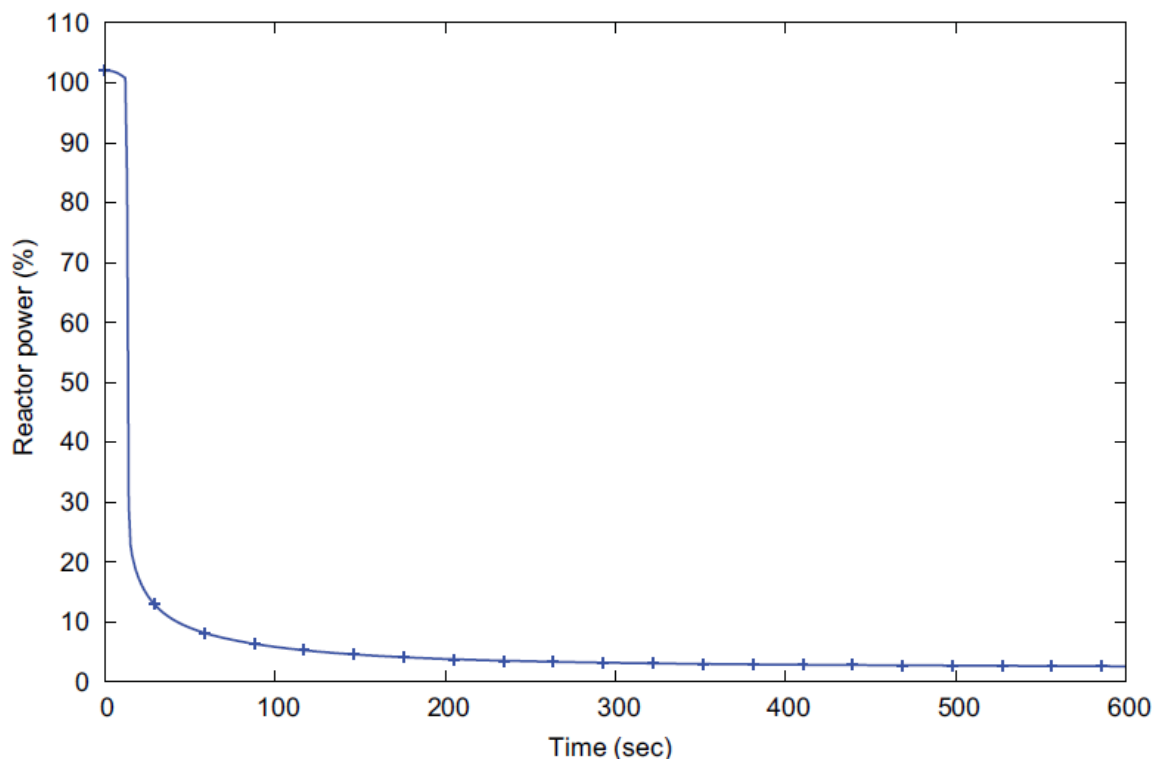


Figura 39. Potencia reactor - Presión pico del RCS, por (LOEL, TT y LOCV)

Fuente: Tomado de [1, p. 289]

Presión pico del sistema de refrigeración del reactor (RCS) por cierre de una o más válvulas de aislamiento de vapor principal (MSIV): aumenta la presión y la temperatura del lado secundario en el generador de vapor (SG). En el caso del diseño del módulo de potencia, la presión y la temperatura también aumentan en el lado primario debido a la disminución de la refrigeración.

El cierre de una o dos MSIV provoca un rápido aumento de la presión del generador de vapor (SG) hasta el setpoint de presión secundaria del sistema de protección del módulo (MPS), lo que provoca un disparo del reactor y la activación del sistema de eliminación del calor de decaimiento (DHRS) y del sistema de aislamiento secundario (SSI) como se observa en la figura 40.

Figure 15.2-10: Reactor Power - Peak RCS Pressure Case (15.2.4 MSIV Closure)

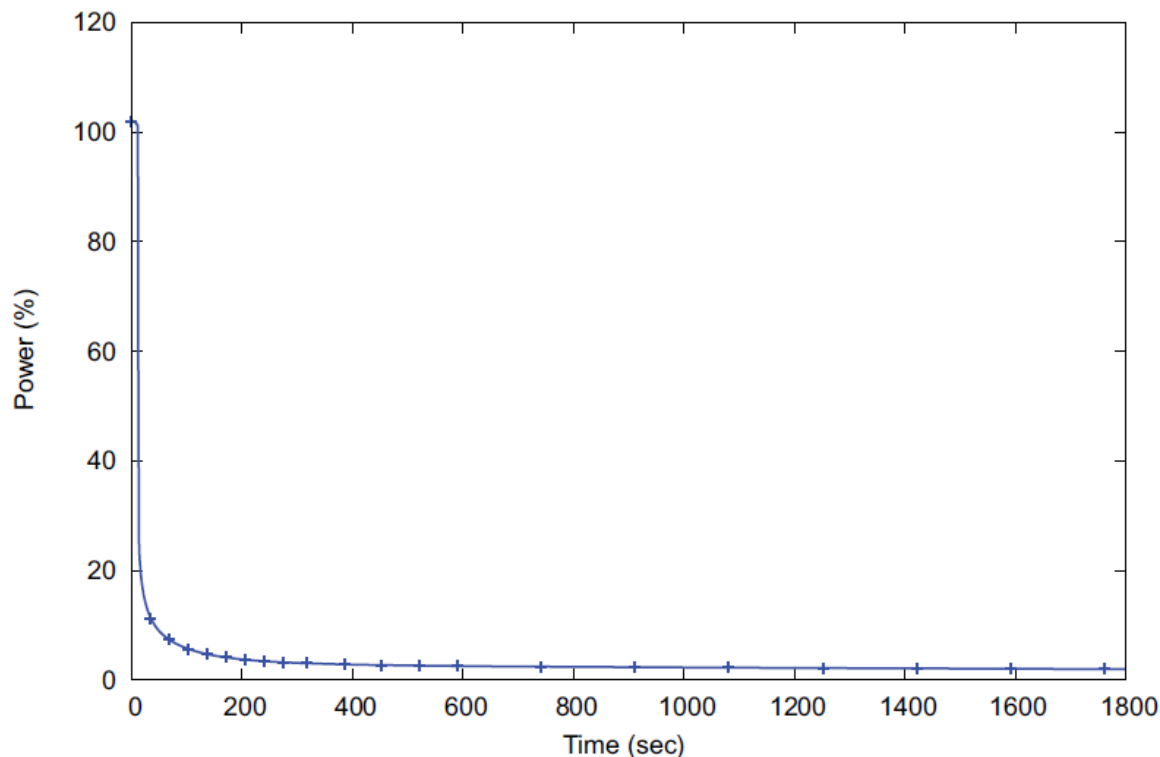


Figura 40. Potencia reactor - Presión pico del sistema de RCS, por cierre de MSIV

Fuente: Tomado de [1, p. 297]

Presión pico del sistema de refrigeración del reactor (RCS) por pérdida de alimentación eléctrica de cargas no esenciales de corriente alterna de los servicios auxiliares de la estación: causa la desconexión del turbogenerador, ver figura 41 y la pérdida de bombas en el lado secundario. La temperatura y la presión del lado primario aumentan debido a que ya no se elimina calor a través de los generadores de vapor. El aumento de presión en el primario o en el secundario inicia un disparo del reactor que reduce la potencia a niveles de calor de decaimiento y acciona el SSI y el DHRS para transferir calor del sistema primario a la piscina del reactor. La presión en los sistemas de refrigeración del reactor y sistemas de vapor principal se mantienen por debajo del 110% de los valores de diseño.

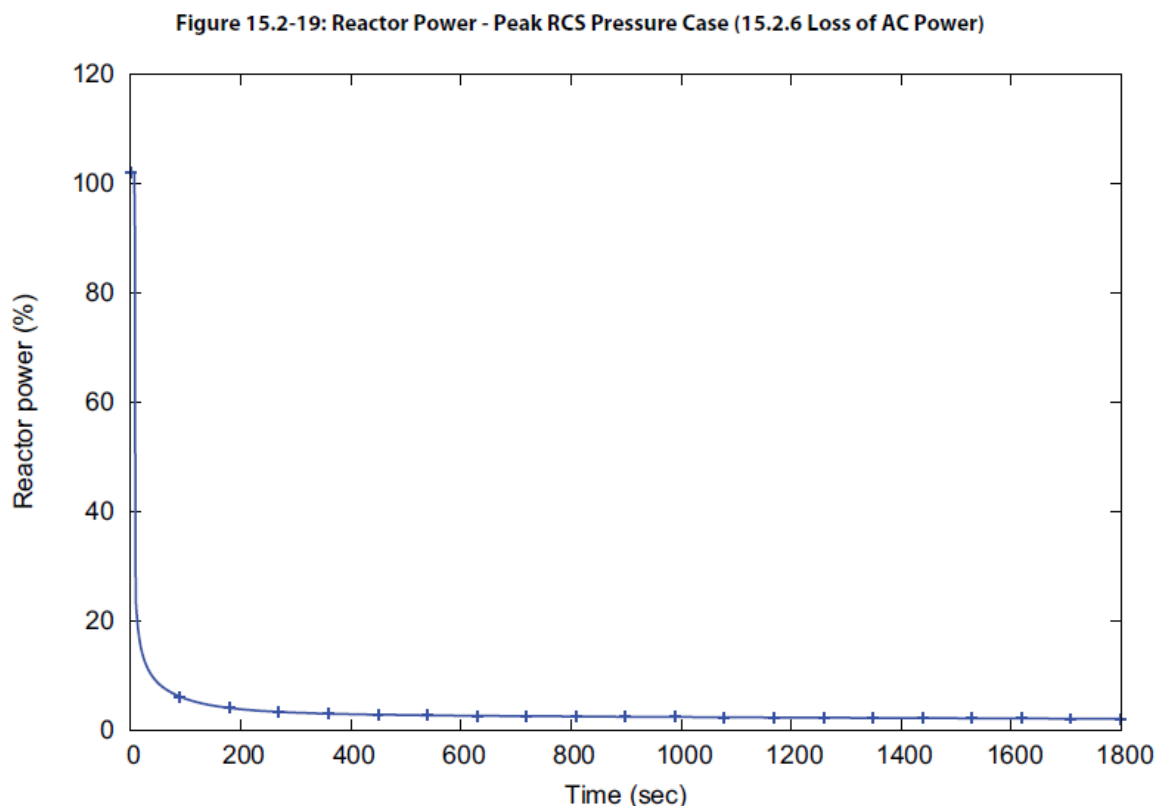


Figura 41. Potencia reactor - Presión pico del sistema de RCS, por pérdida de potencia AC

Fuente: Tomado de [1, p. 306]

Presión pico del sistema de refrigeración del reactor (RCS) por pérdida de agua de alimentación por falla en las bombas, mal funcionamiento de las válvulas o pérdida de potencia AC: disminuye la extracción de calor a través de los generadores de vapor lo que provoca un aumento de la presión y temperatura del RCS, que lleva a un disparo del reactor, como se ve en la figura 42. La pérdida de agua de alimentación puede deberse a la rotura de una tubería del sistema de agua de alimentación.

En un intento de maximizar la respuesta de presión primaria y secundaria y minimizar el flujo crítico de calor (CHF), se realizaron estudios de sensibilidad sobre la pérdida de agua de alimentación (LOFW).

Se identificaron dos casos que proporcionan resultados limitantes: el primer caso incluía una pérdida completa de agua de alimentación (LOFW) y daba como resultado la máxima presión RCS y relación mínima del flujo de calor crítico (MCHFR). El segundo caso evaluaba una pérdida

parcial del flujo de agua de alimentación y daba como resultado la presión máxima del generador de vapor.

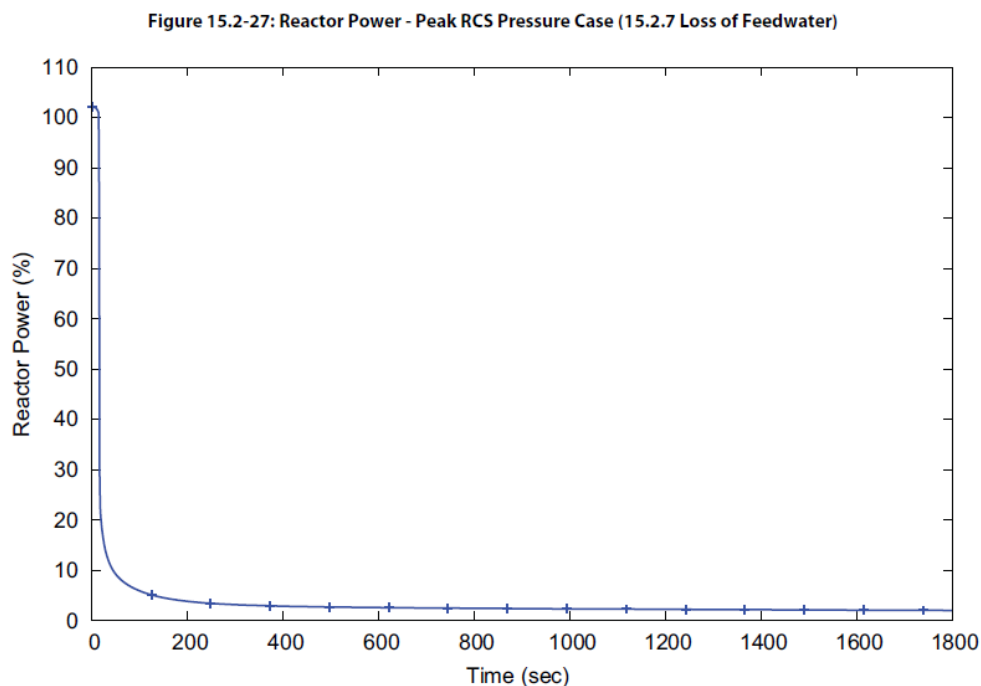


Figura 42. Potencia reactor - Presión pico del sistema de RCS, por pérdida de agua de alimentación

Fuente: Tomado de [1, p. 314]

Aumento del inventario de refrigerante del reactor sin spray en el presurizador: Se realizaron simulaciones con condiciones de entorno normales y en condiciones atípicas en un intento de maximizar el incremento de masa primaria y la tasa de presurización.

En los casos de NO spray en el presurizador, la presurización del sistema primario es mayor que en los casos con spray, este aumento en el inventario de refrigerante cuenta con un tiempo de apagado del reactor menor a 100 segundos como se identifica en la figura 43.

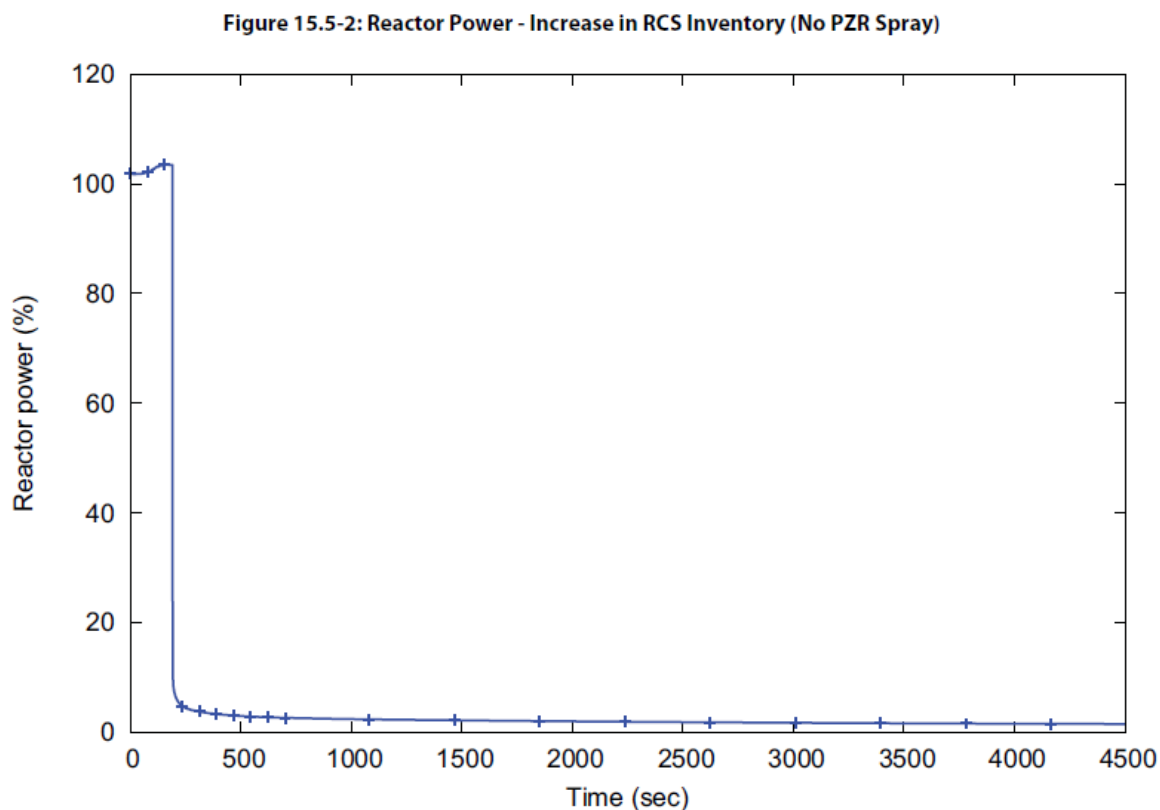


Figura 43. Potencia reactor - Presión pico del sistema de RCS, por aumento del inventario de refrigerante

Fuente: Tomado de [1, p. 460]

En general, se puede concluir que la potencia del reactor tiene tiempos de respuesta menores a los 200 segundos, lo que indica que cuando se presenten este tipo de eventos no deseados, el sistema de control es lo suficientemente robusto para hacer un apagado seguro del reactor, como se registró en el documento de soporte aprobado por el ente regulador de Estados Unidos para construcción del módulo de reactor Nuscale [1].

Capítulo 7

Conclusiones

Se puede diversificar la energía usada en el campo de producción petrolera y reemplazar las fuentes fósiles por energía nuclear a través de SMR, los cuales brindan una energía continua y de bajas emisiones sin tener variabilidad en los precios por fenómenos climáticos como el del Niño. Esto permitiría configurar una matriz eléctrica diversificada y resiliente ante desafíos climáticos y de suministro de combustibles fósiles.

Considerando los 6 parámetros de la NEA/OCDE se seleccionó el módulo VOYGR® de Nuscale, de 77 MWe, en el cual se observa un tiempo de respuesta rápido del apagado seguro del reactor ante los eventos y perturbaciones presentados en las simulaciones, lo que indica que el sistema de control del reactor seleccionado es robusto brindando seguridad en las respuestas a las contingencias evaluadas.

En el análisis realizado se observan beneficios anuales por MUSD\$62,6, esto apalanca la inversión y permite recuperarla en un tiempo menor a 5 años, lo que confirma lo visto en el marco teórico. Se requerirá ir ajustando el modelo financiero, conforme se despliegan los resultados de la puesta en operación de los SMR que ya iniciaron su construcción y una mejora en los esquemas de financiamiento.

La articulación gobierno – empresa – academia es importante, pues se requerirán esfuerzos en formalizar carreras asociadas a las tecnologías nucleares. Se recomienda hacer alianzas con países cuyo desarrollo nuclear sea significativo (Argentina, Estados Unidos, Canadá, Francia, Rusia, Corea, China, entre otros), estableciendo a su vez el mantener empleos especializados y mejor remunerados.

En el mundo hay 32 países que usan energía nuclear y planean seguirla usando para generar energía eléctrica, sumándose 10 países que planean construir SMR. Se observa claramente un resurgimiento de la energía nuclear, con corte a julio de 2024.

Los diseños de SMR usan menos combustible dado que aumentan la frecuencia de reposición del energético, mejorando los costos de operación, por lo tanto, tienen menos residuos y ostentan el menor uso de tierra en comparación con otras fuentes de energía.

Se observan resultados del esfuerzo por parte del Ministerio de Minas y Energía, en cuanto a la actualización de la normativa asociada a las tecnologías nucleares, por ejemplo: la Resolución 40234 del 4 julio de 2024: “Por la cual se establecen los requisitos para la seguridad física en el empleo de fuentes radiactivas de categoría 1, 2 y 3...”, y la Resolución 40306 del 5 de agosto 2024, “Por medio del cual se actualiza el reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos”, mostrando un claro compromiso por parte del Ministerio de Minas y Energía en actualizar su normativa en asuntos nucleares, alineando la regulación nacional con los lineamientos y directrices del OIEA.

Se aconseja continuar con la vigilancia tecnológica para que se desarrolle el estudio de factibilidad y los estudios asociados a la aproximación por hitos sugerido por el OIEA para cualquier estado miembro, en el despliegue de un programa nuclear.

REFERENCIAS

- [1] LLC NuScale Power, “Chapter Fifteen Transient and Accident Analyses”, jul. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrc.gov/docs/ML2022/ML20224A504.pdf>
- [2] Sociedad Nuclear Española, “Flujo crítico de calor (rev.0)”, *Diccionario Nuclear*. 2024. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sne.es/diccionario-nuclear/flujo-critico-de-calor-rev0/>
- [3] Sociedad Nuclear Española, “Economía neutrónica (rev 2*)”, *Diccionario Nuclear*. 2024. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sne.es/diccionario-nuclear/economia-neutronica-rev-2/>
- [4] Sociedad Nuclear Española, “Flujo de neutrones (rev 1)”, *Diccionario Nuclear*. 2024. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sne.es/diccionario-nuclear/flujo-de-neutrones-rev-1/>
- [5] C. Prieto V, “El flujo neutrónico en los reactores nucleares”, Camilo Prieto V. Energía, Clima y Justicia Social. Consultado: el 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://camiloprieto.com/el-flujo-neutronico-en-los-reactores-nucleares/>
- [6] Energy Encyclopedia, “Reactor Using Fast Neutrons (FR)”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/the-nuclear-reactors/reactor-using-fast-neutrons-fr>
- [7] International Energy Agency, “About”, IEA. Consultado: el 29 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/about>
- [8] N. Blair *et al.*, “Resumen del Informe de Progreso: Resultados Preliminares del Modelo y Conjuntos de Datos Solares y Eólica de Alta Resolución”, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-7A40-85144, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85144.pdf>
- [9] J. Lovering, M. Swain, L. Blomqvist, y R. R. Hernandez, “Land-use intensity of electricity production and tomorrow’s energy landscape”, *PLoS ONE*, vol. 17, núm. 7, p. e0270155, jul. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0270155.
- [10] Organismo Internacional de Energía Atómica, “¿Qué son los reactores de sales fundidas?” Consultado: el 29 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-de-sales-fundidas>
- [11] Organismo Internacional de Energía Atómica, “Overview”. Consultado: el 29 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/about/overview>
- [12] L. Downey, “Steam-Assisted Gravity Drainage (SAGD): What It is, How it Works”. Consultado: el 7 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.investopedia.com/terms/s/steam-assisted-gravity-drainage.asp>
- [13] International Atomic Energy Agency, “¿Qué son los reactores modulares pequeños (SMR)?”, IAEA. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>
- [14] XM, “Sistema de Transmisión Regional (STR)”. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.xm.com.co/transmisi%C3%B3n/sistema-de-transmision-regional-str>
- [15] L. Ashton, “Alimentar el futuro: creación de cadenas de suministro de combustible para los SMR y los reactores avanzados”, *Bol. OIEA*, vol. 64–3, sep. 2023, Consultado: el 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/bulletin/alimentar-el-futuro>

- [16] F. Pigna, “La revolución industrial”, *El Historiador*. [En línea]. Disponible en: <https://elhistoriador.com.ar/la-revolucion-industrial/>
- [17] Emma Midgley, “Descarbonizar las industrias con la ayuda de microrreactores y reactores nucleares pequeños”, *Boletín del OIEA*, pp. 12–13, septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/sites/default/files/23-03627sweb.pdf>
- [18] NuScale Nonproprietary, “NuScale SMR Technology. An ideal solution for repurposing U.S. coal plant infrastructure and revitalizing communities”, NuScale Power, LLC, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.nuscalepower.com/hubfs/Website/Files/Technical%20Publications/nuscale-smr-technology-an-ideal-solution-for-coal-plant-replacement.pdf>
- [19] Dalton Nuclear Institute, *Delivering on the Promise of Small Modular Reactors*, (el 7 de febrero de 2024). Consultado: el 21 de abril de 2025. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=3cIwaEGoHp4>
- [20] L. Loflin, B. McRimmon, y S. Swilley, “Advanced Nuclear Technology: Advanced Light Water Reactors Utility Requirements Document Small Modular Reactors Inclusion Summary”, Electric Power Research Institute, 3002003130, nov. 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/ne/articles/advanced-nuclear-technology-advanced-light-water-reactors-utility-requirements-document>
- [21] A. Rusanov, A. Kostikov, V. Tarasova, P. Русаков, y S. Tretiak, “The concept of creating a maneuverable power plant based on a small modular reactor”, *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, núm. 5, 2024, Consultado: el 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/1913-2024/content-5-2024/7020-37>
- [22] R. Lo Frano, G. Forasassi, A. Poggianti, y M. Forni, “Seismic Safety Margin of an Isolated SMR Reactor Under Severe Earthquake”, en *Small Modular Reactors Symposium*, feb. 2012. doi: 10.1115/SMR2011-6578.
- [23] CMNUCC, “El Acuerdo de París”, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [24] L.-R. Issberner y P. Léna, “Antropoceno: la problemática vital de un debate científico”, *El correo de la UNESCO*, el 30 de marzo de 2018. Consultado: el 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://courier.unesco.org/es/articulos/antropoceno-la-problematica-vital-de-un-debate-cientifico>
- [25] International agency energy, “Energy Statistics Data Browser”. el 21 de diciembre de 2023. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>
- [26] Rystad Energy, “Global Nuclear Energy Review 2024”, Rystad Energy, feb. 2024.
- [27] International Atomic Energy Agency, “Nuclear Technology Review 2024”, GC(68)/INF/4, sep. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc68-inf-4.pdf>
- [28] H. Ritchie y M. Roser, “What are the safest and cleanest sources of energy?”, *Our World Data*, mar. 2024, Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>

- [29] Sinergox, “Precio de Oferta por combustible”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sinergox.xm.com.co/trpr/Paginas/Informes/PrecioOfertaCombustible.aspx>
- [30] Unidad de Planeación Minero Energética, “Actualización plan energético nacional (PEN) 2022-2052”, Ministerio de Minas y Energía, 2024. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN-2052.aspx>
- [31] Office of Nuclear Energy, US Department of Energy [@GovNuclear], “More than 93% of the time, nuclear works ALL the time to bring you clean and reliable power”, el 21 de julio de 2024. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://x.com/GovNuclear/status/1815121844124402140>
- [32] International Energy Agency, “Projected Costs of Generating Electricity 2020”, Nuclear Energy Agency, France, dic. 2020. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>
- [33] R. von Flatern, “The Defining Series: Electrical Submersible Pumps”, *Oilfield Review*, 2015. Consultado: el 11 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-esp>
- [34] Made-in-China, “1MW 1MW 3MW 4MW 5MW 6MW 7MW 10MW Hfo aceite combustible pes ado Hfo generador planta eléctrica con Lloyd Registrarse Lrqa de los Cssc / Man”. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_kanpor/product_1MW-1MW-3MW-4MW-5MW-6MW-7MW-10MW-Hfo-Heavy-Fuel-Oil-Hfo-Generator-Set-Power-Plant-with-Lloyd-Register-Lrqa-of-Cssc-Man_rouihsshg.html
- [35] OCDE, “The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition”, OCDE; Nuclear Energy Agency, NEA No. 7671, mar. 2024. Consultado: el 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_90816/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-second-edition?details=true
- [36] International Atomic Energy Agency, “¿Qué es la energía nuclear? La ciencia de la energía nucleoelectrica”, IAEA. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-energia-nuclear-la-ciencia-de-la-energia-nucleoelectrica>
- [37] H. Ritchie, “Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?”, *Our World Data*, sep. 2020, Consultado: el 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [38] International Atomic Energy Agency, *Technology roadmap for small modular reactor deployment*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944_web.pdf
- [39] Energy Encyclopedia, “The Future of Fission Reactors”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/the-nuclear-reactors/the-future-of-fission-reactors>
- [40] F. Venneri, “Micro Modular Reactor (MMR) Energy Systems”, Ultra Safe Nuclear Corporation, sep. 2019. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2019-09/3-4._usnc_mmr.pdf
- [41] J. Halackna, A. Harkness, y A. Schoedel, “WAAP-12580, Revision 0, ‘eVinci Microreactor Overview – Non-Proprietary Open Presentation’”, Westinghouse Electric Company LLC,

- EVR_LTR_230041, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrc.gov/docs/ML2305/ML23053A351.pdf>
- [42] Impact Assessment Agency Canada, “Micro Modular Reactor Project”. Consultado: el 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iaac-aeic.gc.ca/050/evaluations/proj/80182>
- [43] Y. Wang, W. Chen, L. Zhang, X. Zhao, Y. Gao, y V. Dinavahi, “Small Modular Reactors: An Overview of Modeling, Control, Simulation, and Applications”, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 39628–39650, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3351220.
- [44] International Atomic Energy Agency, “Reactores de sales fundidas”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/reactores-de-sales-fundidas>
- [45] Energy Encyclopedia, “High Temperature Reactor (HTGR) - Nuclear energy - Energy Encyclopedia”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/the-nuclear-reactors/high-temperature-reactor-htgr>
- [46] OECD, “High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications”, Nuclear Energy Agency; Organisation For Economic Co-Operation And Development, 2022. Consultado: el 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_70442/high-temperature-gas-cooled-reactors-and-industrial-heat-applications?details=true
- [47] GIF Portal, “Welcome to the new Generation IV International Forum’s Public Website - Redirection Hub”. Consultado: el 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gen-4.org/welcome-new-generation-iv-international-forums-public-website-redirection-hub>
- [48] M. A. Fütterer *et al.*, “The High Temperature Gas-Cooled Reactor”, en *Encyclopedia of Nuclear Energy*, E. Greenspan, Ed., Oxford: Elsevier, 2021, pp. 512–522. Consultado: el 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489122055>
- [49] International Atomic Energy Agency, “Reactores refrigerados por agua”. Consultado: el 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/reactores-refrigerados-por-agua>
- [50] E. Encyclopedia, “Pressurized Water Reactor (PWR) - Nuclear energy - Energy Encyclopedia”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/the-nuclear-reactors/pressurized-water-reactor-pwr>
- [51] Energy Encyclopedia, “Boiling Water Reactor (BWR)”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/the-nuclear-reactors/boiling-water-reactor-bwr>
- [52] International Atomic Energy Agency, *IAEA nuclear safety and security glossary*. IAEA, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-NSS-GLOweb.pdf>
- [53] D. A. Galeano González, “Desmantelando mitos de la energía nuclear”, *Revista EPM*, núm. 21, pp. 27–43, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.linkedin.com/posts/david-galeano-6a0817198_desmantelando-mitos-de-la-energ%C3%ADa-nuclear-activity-7133210899984605185-

- wWFI?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAFMcgYBffq_PvaxdFGmasfvMpp5Oa2nzew
- [54] K. Godsey, “Life Cycle Assessment of Small Modular Reactors Using U.S. Nuclear Fuel Cycle”, Master Thesis, Clemson University, 2019. [En línea]. Disponible en: https://open.clemson.edu/all_theses/3235
- [55] H. Khalil, R. Bennett, y R. Versluis, “The generation iv nuclear energy systems technology roadmap”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.oecd-nea.org/science/rd/presentations/2-2-doc.pdf>
- [56] International Energy Agency, “The Path to a New Era for Nuclear Energy”, IEA, ene. 2025. Consultado: el 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy>
- [57] Georgia Association of Manufacturers, “Vogtle Unit 4 Operation Delayed; Ratepayer Responsibility Capped”, Georgia Association of Manufacturers. [En línea]. Disponible en: <https://www.gamfg.org/2024/02/13/vogtle-unit-4-delayed/>
- [58] Today in Energy, “Plant Vogtle Unit 4 begins commercial operation: U.S. Energy Information Administration (EIA)”. Consultado: el 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=61963>
- [59] World Nuclear News, “EDF announces Hinkley Point C delay and rise in project cost”, *Wnn*, el 23 de enero de 2024. Consultado: el 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://world-nuclear-news.org/articles/edf-announces-hinkley-point-c-delay-and-big-rise-i>
- [60] S.-G. Lim, S. Heo, T. C. Park, J. Cheon, y H. G. Kim, “Passive safety system and safety demonstration of innovative small modular reactor”, en *International Conference on Small Modular Reactors and their Applications*, Vienna, oct. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/24/10/cn-327_conference_progr_amme.pdf
- [61] A. E. Finan, K. Miu, y A. C. Kadak, “Nuclear Technology and Canadian Oil Sands: Integration of Nuclear Power with In-Situ Oil Extraction”, American Nuclear Society - ANS, La Grange Park (United States), jul. 2006. Consultado: el 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/21021195>
- [62] P. Sanongboon, T. Pettigrew, y M. Moore, “Techno-economic analysis of small modular reactor for oil sands extraction and upgrading in Canada”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 425, p. 113325, ago. 2024, doi: 10.1016/j.nucengdes.2024.113325.
- [63] Congreso de la República de Colombia, “Ley 16 de 1960. Por la cual se aprueba el Estatuto del Organismo Intercontinental de Energía Atómica, suscrito en la Ciudad de New York el 26 de octubre de 1956”, *Diario Oficial No. 30348*, el 25 de septiembre de 1960. Consultado: el 22 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1821500#>
- [64] International Atomic Energy Agency, “Estatuto del organismo internacional de energía atómica (o.i.e.a.)”, el 23 de octubre de 1956. Consultado: el 22 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/statute_sp.pdf
- [65] Organismo Internacional de Energía Atómica, “Estatuto”. Consultado: el 22 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/el-oiea/estatuto>
- [66] Ministro de Minas y Energía, “Resolución No. 1434. Por la cual se adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica”, *Diario oficial NO. 45027*, el 5 de diciembre de 2002. Consultado: el 7 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/7512/20914-1695.pdf>

- [67] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución 18-1289. Por la cual se establecen los requisitos para la obtención de licencia para la prestación del servicio de dosimetría personal”, *Diario Oficial No. 45731*, el 6 de octubre de 2004. Consultado: el 7 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/7521/RES181289_2004.pdf
- [68] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución 18-1419 de 2004. Por la cual se reglamenta la expedición de la Licencia de Importación de Materiales Radiactivos”, el 4 de noviembre de 2004. Consultado: el 7 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/7516/RES181419_2004.pdf
- [69] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución número 18-1475. Por la cual se expide el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y se establecen los requisitos para la obtención de licencias para su operación, parada prolongada, modificación y desmantelamiento”, el 12 de noviembre de 2004. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/7522/RES181475_2004.pdf
- [70] Congreso de la República de Colombia, “Resolución 181682. Por la cual se adopta el Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos”, *Diario Oficial No. 46.124*, el 16 de diciembre de 2005. Consultado: el 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minminas_181682_2005.htm
- [71] Ministerio de Minas Y Energía, “Resolución número 18-0052. Por la cual se adopta el sistema de categorización de las fuentes radiactivas”, el 21 de enero de 2008. Consultado: el 22 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mincit.gov.co/getattachment/e5f4e493-cc38-40f5-9b5d-2ddc0d4bb235/Resolucion-180052-del-21-de-enero-de-2008-Por-la-c.aspx>
- [72] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución número 18-0005. Por la cual se adopta el Reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia.”, el 5 de enero de 2010. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/7518/RES180005_2010.pdf
- [73] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución No. 41178. Por medio de la cual se modifica y adiciona la Resolución 18 005 de 2010, por la cual se adopta el reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia”, el 2 de diciembre de 2016. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/7520/37308-Resoluci%C3%B3n-41178-2Dic2016.pdf>
- [74] Presidente De La República de Colombia, “Decreto 381 de 2012. Por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Minas y Energía”, *Diario Oficial. N. 48345*, el 16 de febrero de 2012. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/7511/22620-11399_M5oMykV.pdf
- [75] Ministerio de Minas y Energía, “Decreto 1617 de 2013. Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 381 del 16 de febrero de 2012”, *Diario Oficial No. 48.867*, el 30 de julio de 2013. Consultado: el 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_1617_2013.html
- [76] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución 90874. Por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas”, el 11 de agosto de 2014. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/7514/Resoluci%C3%B3n_90874_del_11_de_agosto_de_2014.pdf

- [77] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución No. 41226. Por medio de la cual se modifica la resolución 90874 de 2014, por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas”, dic. 2016, Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/7515/37323-Resolucion-41226-16Dic2016.pdf>
- [78] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución No. 40234 del 4 de julio de 2024: ‘Por la cual se establecen los requisitos para la seguridad física en el empleo de fuentes radiactivas de categoría 1, 2 y 3, y, se modifica parcialmente la Resolución 90874 de 2014.’”, el 4 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://normativame.minenergia.gov.co/normatividad/6971/norma/>
- [79] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución No. 40306 de 2024, Por medio de la cual se actualiza el Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos”, el 5 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/12300/Resoluci%C3%B3n_Reglamento_de_Transporte_40306-2024.pdf
- [80] C. Stoiber, A. Baer, N. Pelzer, y W. Tonhauser, *Manual de derecho nuclear*. VIENA: Organismo Internacional de Energía Atómica, 2006. [En línea]. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1160s_web.pdf
- [81] Congreso de la República de Colombia, “Ley 766 de 2002. Por medio de la cual se aprueba la ‘Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica’, aprobada en Viena el 26 de septiembre de 1986”, *Diario Oficial* 44.889, el 5 de agosto de 2002. Consultado: el 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=19132>
- [82] Congreso de la República de Colombia, “Ley 702 de 2001. Por medio de la cual se aprueba la Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares, aprobada en Viena, el 26 de septiembre de 1986.”, *Diario oficial. No. 44628*, el 21 de noviembre de 2001. Consultado: el 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1666685>
- [83] Organismo Internacional de Energía Atómica, “Convención sobre seguridad nuclear (csn)”. el 17 de junio de 1994. [En línea]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/19/09/19-00679s_web_cns.pdf
- [84] Organismo Internacional de Energía Atómica, “Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos”. el 5 de septiembre de 1997. [En línea]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/24/09/24-01066s_web.pdf
- [85] International Atomic Energy Agency, “Código de conducta sobre seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas”. IAEA, 2004. [En línea]. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Code-2004_web.pdf
- [86] Organismo Internacional De Energía Atómica, “Código de Conducta sobre la seguridad de los reactores de investigación”, International Atomic Energy Agency, Text, 2006. Consultado: el 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/publications/13546/codigo-de-conducta-sobre-la-seguridad-de-los-reactores-de-investigacion>

- [87] Organismo Internacional De Energía Atómica, “Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos”, International Atomic Energy Agency, Text, 2019. Consultado: el 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/publications/13493/reglamento-para-el-transporte-seguro-de-materiales-radiactivos>
- [88] Congreso de la República de Colombia, “Ley 47 de 1982. Por medio de la cual se aprueba el ‘Acuerdo entre la República de Colombia y el Organismo Internacional de Energía Atómica para la aplicación de salvaguardias en relación con el Tratado para la proscripción de las armas nucleares en la América Latina’, firmado en Viena el 27 de julio de 1979”, *Diario Oficial No. 36159*, el 28 de diciembre de 1982. Consultado: el 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1601780>
- [89] Congreso de la República de Colombia, “Ley 1156 de 2007. Por medio de la cual se aprueba el ‘Protocolo adicional al Acuerdo entre la República de Colombia y el Organismo Internacional de Energía Atómica para la aplicación de salvaguardias en relación con el tratado para la proscripción de las armas nucleares en la América Latina’, hecho en Viena a los 11 días del mes de mayo de 2005”, *Diario Oficial No. 46.757*, el 20 de septiembre de 2007. Consultado: el 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1156_2007.html
- [90] Organismo Internacional de Energía Atómica, “Convención de Viena sobre responsabilidad civil por daños nucleares”. IAEA, el 21 de mayo de 1963. Consultado: el 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc500_sp.pdf
- [91] Organismo Internacional de Energía Atómica, “Protocolo de enmienda de la convención de Viena sobre responsabilidad civil por daños nucleares”. IAEA, el 12 de septiembre de 1997. Consultado: el 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/1998/infcirc566a2_sp.pdf
- [92] International Atomic Energy Agency, “Joint Protocol Relating to the Application of the Vienna Convention and the Paris Convention”. Consultado: el 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-liability-conventions/joint-protocol-relating-to-application-of-vienna-convention-and-paris-convention>
- [93] International Atomic Energy Agency, “Convention on Supplementary Compensation for Nuclear Damage”. Consultado: el 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-liability-conventions/convention-supplementary-compensation-nuclear-damage>
- [94] J. F. Cristo Bustos, “Proyecto de ley Nuclear. Por el cual se crea la Agencia Nacional de Seguridad Nuclear - ANSN y se establece el marco legislativo que regula las actividades que involucran el uso de las radiaciones ionizantes, los materiales nucleares y los materiales radiactivos en el territorio nacional”, *Gaceta N 068 de 2025*. Consultado: el 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.camara.gov.co/ley-nuclear>
- [95] Crystal Robinson y Nuclear Regulatory Commission, “NuScale Power, LLC; US600 Standard Design Certification and Standard Design Approval”, *Federal Register*, vol. 89, núm. 67, el 5 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2024-04-05/pdf/2024-07210.pdf>
- [96] D. Claudio, “NuScale Power Overview – Energiforsk Nuclear Seminar 2021”, Nuscale, ene. 2021. [En línea]. Disponible en: https://energiforsk.se/media/29017/claudio_nuscale.pdf

- [97] Foro Nuclear, “22 países firman en la COP28 su decidida apuesta por la energía nuclear”. Consultado: el 7 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/actualidad/noticias/22-paises-firman-en-la-cumbre-del-clima-su-decida-apuesta-por-la-energia-nuclear/>
- [98] Banco Mundial, “PIB (US\$ a precios actuales) - Colombia”. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD?locations=CO>
- [99] International Atomic Energy Agency, “Un punto de inflexión: concluye la primera edición de la Cumbre sobre Energía Nuclear en Bruselas”. Consultado: el 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/un-punto-de-inflexion-concluye-la-primera-edicion-de-la-cumbre-sobre-energia-nuclear-en-bruselas>
- [100] Net zero nuclear, “COP29 Baku Azerbaijan”. Consultado: el 29 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://netzeronuclear.org/cop/cop29>

Anexo 1 Reactores Nucleares en operación y bajo construcción en el mundo

Table A-1. Nuclear power reactors in operation and under construction in the world^a

COUNTRY	Reactors in Operation		Reactors in Suspended Operation		Reactors Under Construction		Nuclear Electricity Supplied	
	No. of Units	Total MW(e)	No. of Units	Total MW(e)	No. of Units	Total MW(e)	TW(e).h	Nuclear Share %
ARGENTINA	3	1 641			1	25	9.0	6.3
ARMENIA	1	416					2.5	31.1
BANGLADESH					2	2 160		
BELARUS	2	2 220					11.0	28.6
BELGIUM	5	3 908					31.3	41.2
BRAZIL	2	1 884			1	1 340	13.7	2.2
BULGARIA	2	2 006					15.5	40.5
CANADA	19	13 699					83.5	13.7
CHINA	55	53 152			24	24 948	406.5	4.9
CZECH REP.	6	3 934					28.7	40.0
EGYPT					3	3 300		
FINLAND	5	4 394					32.8	42.0
FRANCE	56	61 370			1	1 630	323.8	64.8
HUNGARY	4	1 916					15.1	48.8
INDIA	19	6 290	4	639	8	6 028	44.6	3.1
IRAN, ISL.REP	1	915			1	974	6.1	1.7
JAPAN	12	11 046	21	20 633	2	2 653	77.5	5.5
KOREA, REP.OF	26	25 825			2	2 680	171.6	31.5
MEXICO	2	1 552					12.0	4.9
NETHERLANDS, KINGDOM OF THE	1	482					3.8	3.4
PAKISTAN	6	3 262					22.4	17.4
ROMANIA	2	1 300					10.3	18.9
RUSSIA	37	27 727			3	2 700	204.0	18.4
SLOVAKIA	5	2 308			1	440	17.0	61.3
SLOVENIA	1	688					5.3	36.8
SOUTH AFRICA	2	1 854					8.2	4.4
SPAIN	7	7 123					54.4	20.3
SWEDEN	6	6 944					46.6	28.6
SWITZERLAND	4	2 973					23.4	32.4
TÜRKIYE					4	4 456		
UAE	3	4 011			1	1 310	31.2	19.7
UK	9	5 883			2	3 260	37.3	12.5
UKRAINE	15	13 107			2	2 070	NA	NA
USA	93	95 835			1	1 117	742.4	18.5
Worldwide^{b,c}	413	371 539	25	21 272	59	61 091	2 508.7^c	N/A

Note: NA – Not Available, N/A – Not Applicable.

^a Source: Agency's Power Reactor Information System (PRIS) (www.iaea.org/pris) as per data provided by Member States by 16 June 2024.

^b The total figures include the following data from Taiwan, China: 2 units, 1 874 MW(e) in operation and 17.2 TW-h of electricity supplied, accounting for 6.9% of the total electricity mix.

^c The total electricity production does not include Ukraine as operational data was not submitted for the year 2023.

Fuente: Tomado de [27]