



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

PLANEACIÓN DE EXPANSIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR EN MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

MARCO ANTONIO CRUZ VILCHIZ

TUTORA PRINCIPAL

DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.

MARZO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. FRANÇOIS LACOUTURE JUAN LUIS
Secretario: DRA. NELSON EDELSTEIN PAMELA FRAN
1 er. Vocal: DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ
2 do. Vocal: DR. QUEZADA GARCÍA SERGIO
3 er. Vocal: M.I. RENTERÍA DEL TORO FLORENCIA DE LOS ANGELES

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, CDMX

TUTOR DE TESIS:

DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ

FIRMA

"The mind is like a parachute, it Works better when it's open."

Agradecimientos

Gracias al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) quien me otorgó una beca como estudiante del programa de Maestría en Ingeniería en Energía de la UNAM.

Agradezco al proyecto PAPIIT-UNAM número IT102621 Modelación de la Transición Energética por hacer posible la evaluación de beneficios económicos, ambientales y sociales para México al año 2030.

Agradezco al Proyecto IAEA/INPRO. Escenarios de Despliegue Sostenible de Reactores Modulares Pequeños (ASENES). An INPRO Service to Member States. Agencia Internacional de Energía Atómica.

Y especialmente agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría los cuales me han ayudado en mi crecimiento personal y profesional.

Resumen

El presente documento muestra un acercamiento al panorama de la energía nuclear en el mundo y se expone la participación de la energía nuclear en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Además, se presenta la generación eléctrica en México junto con la capacidad instalada de tecnologías de generación, donde resalta la generación eléctrica con combustibles fósiles sobre todo gas natural. Se establecieron tres sistemas de energía nuclear para efectuar una comparación y evaluación mediante el uso de la metodología KIND-Evaluation Tool, la cual nos proporciona la facilidad de realizar una evaluación comparativa basada en indicadores diseñados para calificar los reactores modulares pequeños en tres pilares de la sostenibilidad (económico, ambiental y social). Los resultados obtenidos de la metodología determinan el reactor óptimo para la expansión de energía nuclear en México mediante reactores modulares pequeños.

Abstract

This document shows an approach to the nuclear energy outlook in the world and its contribution to the Sustainable Development Goals of the United Nations. In addition, electricity generation in Mexico is presented along with the installed capacity of generation technologies, where electricity generation with fossil fuels, especially natural gas, stands out. Three nuclear energy systems were studied for comparison and evaluation using the KIND-Evaluation Tool methodology, which facilitates a comparative evaluation based on indicators designed to qualify the SMRs in three pillars of sustainability (economic, environmental, and social). The results obtained from the KIND-ET methodology determine the optimal reactor for expanding nuclear energy in Mexico through small modular reactors.

Contenido

Índice de Figuras.....	9
Índice de Tablas.....	10
Acrónimos.....	11
Introducción.....	12
Planteamiento del Problema.....	12
Preguntas de Investigación.....	13
Objetivos.....	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	13
Capítulo 1. Panorama de la energía nuclear en el Mundo.....	15
1.1 Factores clave conductores de los sistemas eléctricos actuales.....	15
1.2 Apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica.....	16
1.3 Situación actual de la energía nuclear en el mundo	18
1.4 Energía nuclear limpia y segura.....	22
1.5 La participación de la energía nuclear en los objetivos de desarrollo sostenible	25
Capítulo 2. Panorama de la energía eléctrica en México.....	34
2.1 Generación eléctrica en México	34
2.2 Experiencia nuclear en México.....	37
2.3 Plan de expansión de la energía nuclear en México	39
Capítulo 3. Reactores modulares pequeños.....	43
3.1 Generaciones de reactores nucleares.....	43
3.2 Small modular reactors.....	44
3.3 Reactor nuclear BWRX-300	46
3.4 Reactor nuclear VOYGR	49
3.5 Reactor nuclear SMART	52
Capítulo 4. Metodología KIND-ET	55
4.1 Aplicación de MCDA en el marco KIND-ET	56
4.2 Elaboración del árbol de objetivos	60
4.3 Tabla de desempeño	66
4.4 Tabla de función de valor de atributo único	67
4.5 Clasificación de Resultados	68
4.6 Análisis de sensibilidad de los pesos	70

4.7 Extensiones KIND-ET.....	72
4.7.1 Identificador de Dominación.....	72
4.7.2 Generador de diferenciales de puntuación general	73
4.7.3 Mapeo de datos	75
Capítulo 5. Conclusiones	80
REFERENCIAS.....	82

Índice de Figuras

Figura 1. Porcentaje de producción de electricidad en el mundo.	18
Figura 2. Reactores nucleares en el mundo.	19
Figura 3. Reactores nucleares en operación por país.	20
Figura 4. Reactores nucleares en construcción por país.	20
Figura 5. Reactores nucleares y capacidad neta operativa en el mundo.	21
Figura 6. Balance histórico de reactores nucleares.	21
Figura 7. Generación de energía nuclear.	22
Figura 8. Comparativa de GEI, muertes por accidentes y contaminación del aire.	24
Figura 9. Objetivos de Desarrollo Sostenible.	28
Figura 10. Generación eléctrica del SEN por tipo de tecnología.	34
Figura 11. Capacidad instalada del SEN por tipo de tecnología.	37
Figura 12. Vista aérea de la CNLV.	39
Figura 13. Capacidad instalada proyectada de energía nuclear en PRODESEN.	39
Figura 14. Adiciones de capacidad instalada PRODESEN 2023-2037.	40
Figura 15. Capacidad instalada energía nuclear en los diferentes PAMRNT por escenario a 2050 .	41
Figura 16. Índice de diversificación de la capacidad instalada por escenarios del PAMRNT a 2050.	41
Figura 17. Generaciones de reactores nucleares.	44
Figura 18. Desarrollo e implementación de SMRs en el mundo.	45
Figura 19. Cronograma de implementación desde el año 2020.	46
Figura 20. Proyección de una central de generación BWRX-300.	47
Figura 21. Vasija del Reactor BWRX-300.	47
Figura 22. Diagrama de planta de una central BWRX-300.	48
Figura 23. Layout de una central de generación VOYGR-12.	50
Figura 24. Vasija del reactor NuScale Power Module.	51
Figura 25. Vista de corte lateral de una central de generación VOYGR-12.	51
Figura 26. Vasija del reactor SMART.	53
Figura 27. Layout de una central de generación SMART.	54
Figura 28. Árbol de objetivos.	60
Figura 29. Árbol de objetivos basado en los ODS.	63
Figura 30. Puntuaciones resultantes de la función multiatributo.	69
Figura 31. Puntuaciones de los objetivos de alto nivel.	69
Figura 32. Puntuaciones de las áreas de evaluación.	70
Figura 33. Puntuaciones caso modificado de la sensibilidad de los pesos.	71
Figura 34. Tabla de dominancia.	72
Figura 35. Indicadores dominantes.	73
Figura 36. Diagrama de cajas y bigotes.	74
Figura 37. Diagrama de cajas y bigotes.	75
Figura 38. Mapeo de calor de las puntuaciones generales pilar económico vs pilar ambiental.	76
Figura 39. Mapeo pilar económico vs pilar ambiental.	77
Figura 40. Mapeo de calor de las puntuaciones generales pilar económico vs pilar social.	77
Figura 41. Mapeo pilar económico vs pilar social.	78
Figura 42. Mapeo de calor de las puntuaciones generales pilar ambiental vs pilar social.	78
Figura 43. Mapeo pilar ambiental vs pilar social.	79

Índice de Tablas

Tabla 1. Publicaciones guía del OIEA.....	17
Tabla 2. Evolución de la generación total eléctrica 2018-2022 [GWh].....	35
Tabla 3. Capacidad instalada del SEN [MW]	36
Tabla 4. Escenarios de capacidad instalada de energía nuclear.	40
Tabla 5. Comparación de los enfoques MODM y MCDA.	56
Tabla 6. Funciones de valor de atributo único en KIND-ET.....	58
Tabla 7. Indicadores de evaluación.	64
Tabla 8. Valores de los indicadores de evaluación.....	65
Tabla 9. Tabla de desempeño.	66
Tabla 10. Factores de peso.....	67
Tabla 11. Funciones de valor de atributo único.....	68
Tabla 12. Calificaciones resultantes.	68
Tabla 13. Tabla de pesos de los objetivos de alto nivel.	70
Tabla 14. Puntuaciones sensibilidad de los pesos.....	70
Tabla 15. Tabla de dominancia caso de estudio.	73

Acrónimos

BWR: Boiler Water Reactor

CANDU: Canadá Deuterio Uranio

CFE: Comisión Federal de Electricidad

CNEN: Comisión Nacional de Energía Nuclear

CNLV: Central Nuclear de Laguna Verde

CNSNS: Comisión Nacional de Seguridad y Salvaguardias Nucleares

ESBWR: Economic Simplified Boiling Water Reactor

GEI: Gases de efecto invernadero

IAEA: International Atomic Energy Agency

INEN: Instituto Nacional de Energía Nuclear

ININ: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

INPRO: International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles

KAERI: Korea Atomic Energy Research Institute

KI: Key Indicators

KIND-ET: KIND Evaluation Tool

LOCA: Loss-Of-Coolant Accident

MAVT: Multi-attribute Value Theory

MCD: Multi-criteria decision analysis

NES: Nuclear Energy System (Sistema de Energía Nuclear)

NRC: Nuclear Regulatory Commission

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica

PAMRNT: Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión

PRIS: Power Reactor Information System

PRODESEN: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional

PWR: Pressurized Water Reactor

SEN: Sistema Eléctrico Nacional

SENER: Secretaría de Energía

SI: Secondary Indicators

SMRs: Small Modular Reactors

URAMEX: Uranio Mexicano

WNISR: World Nuclear Industry Status Report

Introducción

Planteamiento del Problema

Actualmente, la generación eléctrica en México se basa predominantemente en combustibles fósiles, en su mayoría gas natural (55.1% de ciclo combinado en el año 2022), derivados del petróleo (5.9% termoeléctrica) y carbón (4.2% de carboeléctrica) [1], produciendo efectos negativos atribuibles a la generación de emisiones contaminantes que impactan en la salud de la población y de igual manera contribuyen con el cambio climático¹. Por lo tanto, es necesario diversificar la matriz de generación eléctrica de México aumentando la participación de la energía nuclear como parte de las energías limpias.

Es importante que la futura planeación energética del país se realice con base en las exigencias técnicas, económicas, ambientales, políticas y sociales que el sector eléctrico demanda, con la finalidad de consolidar un sector eléctrico capaz de abastecer la energía necesaria para el desarrollo sostenible del país. En cuanto a generación eléctrica mediante tecnología nuclear, en México se cuenta con la experiencia proporcionada por la Central Nuclear de Laguna Verde (CNLV) que, con sus dos unidades de generación eléctrica con capacidad instalada de 1608 [MW], proporcionó 10,539.5 [GWh] lo que representa un 3.1% de la generación total del país en el año 2022 [1].

Los acuerdos entre México y Estados Unidos en materia de energía nuclear fortalecerán la cooperación bilateral para el desarrollo del sector nuclear en el país. Se reportó el pasado 3 de noviembre del 2022 la firma entre México y Estados Unidos del acuerdo “123” de cooperación nuclear civil, con el cual México podrá reforzar la cooperación nuclear que estable un puente para el comercio nuclear de Estados Unidos con México, logrando contribuir con el crecimiento en la investigación nuclear y la producción de energía nuclear en México. [2]

La energía eléctrica se ha convertido en un factor de vital importancia en el día a día de la humanidad. Es entonces que surge la importancia de contar con un sistema eléctrico que permita cubrir ciertos atributos importantes:

- Se requiere asegurar la disponibilidad. Es una necesidad tener energía eléctrica disponible en cualquier momento de las actividades diarias de la humanidad.
- Manifiestar confiabilidad. El suministro de energía eléctrica requiere ser constante en donde sea requerida, minimizar la ocurrencia de apagones imprevistos.
- Energía de calidad. Es importante que el suministro recibido no presente variaciones importantes, para asegurar un uso óptimo de los equipos que requieren dicha energía eléctrica y la eficiencia energética sea mejor. Los apagones tienden a dañar aparatos electrónicos debido a los picos de potencia que generan y originan la necesidad de implementar reguladores para protección de electrodomésticos impactando en la economía de la población.
- Precio accesible. La energía eléctrica pasa a ser una necesidad básica en la población, por lo cual es importante contar con generación eléctrica que proporcione precios accesibles para la población.

¹ WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021.

- **Sustentabilidad.** Con los problemas que se afrontan en cuestiones de calentamiento global, resulta de gran importancia que el sector de generación eléctrica sea sostenible. Es vital que la energía eléctrica consumida se origine por fuentes de generación, en la medida de lo posible, con bajas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes relacionados con la calidad del aire, los impactos a cuerpos de agua y suelos.

En el presente estudio se trabaja en una metodología basada en una planeación integral que considere un análisis de toma de decisiones con indicadores económicos, ambientales, sociales y políticos la cual permitirá identificar los reactores óptimos para el despliegue de energía nuclear en México. Se busca promover un sistema eléctrico nacional más sostenible, en donde la energía nuclear sea una opción que puede contribuir como una fuente de generación limpia, confiable y segura a los diferentes modelos energéticos brindando un sistema híbrido.

Dentro de un panorama donde México cuenta con experiencia en energía nuclear gracias a la participación de la CNLV en la matriz de generación eléctrica del país, considerar un plan de expansión de la energía nuclear se torna importante para la transición energética del país y la construcción de un Sistema Eléctrico Nacional (SEN) sostenible.

Los SMRs (Small Modular Reactors) son reactores nucleares, principalmente de generación III+, con una potencia de generación de hasta 300 [MWe], cuentan con la capacidad de ser diseñados y ensamblados a partir de diferentes módulos pequeños que pueden ser construidos en fábricas y transportados al sitio de instalación, haciendo posible la construcción de diferentes unidades de manera paralela. Los SMRs se presentan como una opción para un despliegue de generación eléctrica mediante energía nuclear, ayudando en la transición energética de México, mediante una generación de electricidad limpia con una tecnología confiable y segura, brindando seguridad al sistema eléctrico nacional y diversificando la matriz de generación eléctrica.

Preguntas de Investigación

Mediante el planteamiento del problema de la diversificación en la generación eléctrica en el país, se proporciona un enfoque en una planeación de expansión de generación nuclear, formulando las preguntas que el desarrollo de la tesis podrá responder:

1. ¿Qué reactor nuclear es el más adecuado para su uso en México?
2. ¿Cuánta capacidad nuclear es recomendable instalar en el país?
3. ¿Qué escenario es el adecuado para el despliegue de reactores nucleares?
4. ¿En qué regiones del país es más conveniente instalar reactores nucleares?

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar una metodología que permita evaluar y determinar, mediante el uso de diferentes indicadores, los reactores nucleares adecuados y su despliegue en el tiempo para la expansión de energía nuclear en México.

Objetivos específicos

Con la finalidad de cumplir con el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos:

- Determinar los indicadores pertinentes para la evaluación de reactores nucleares.

- Determinar los reactores nucleares adecuados para la expansión en el país.

En el presente trabajo se consideran SMRs entre los cuales está el reactor BWRX-300 fabricado por General Electric, la configuración VOYGR-6 del fabricante NuScale que considera seis módulos de reactores NuScale Power Module, y por último se considera el reactor SMART fabricado por el Instituto de Investigación de Energía Atómica de Corea (Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)).

En el capítulo 1 se expone el apoyo que otorga el Organismo Internacional de Energía Atómica, promoviendo el uso de tecnología nuclear en diferentes campos prácticos, en condiciones seguras y con fines pacíficos. Además, se esboza un panorama actual de la energía nuclear en el mundo, tocando temas como la generación eléctrica mundial, reactores de potencia en operación y construcción, países con mayor número de reactores en construcción y operación. De igual manera, se presenta a la energía nuclear como una fuente de generación limpia y segura.

El capítulo 2 presenta el panorama del sector eléctrico en México y la experiencia nuclear del país. En dicho capítulo se describe cómo se conforma la matriz de generación eléctrica de México, la cual se basa fuertemente en combustibles fósiles, especialmente el gas natural. También presenta la experiencia de México en materia nuclear y el panorama futuro de la energía nuclear en el país.

El capítulo 3 muestra una breve introducción a los SMRs, posteriormente se muestra las principales características de los tres SMRs utilizados para el análisis, en donde se describen los hitos logrados en cuanto a su desarrollo y las diferentes configuraciones de planta que presentan.

En el capítulo 4 se describe la teoría de valor multiatributo (MAVT) y cómo se relaciona con la metodología KIND-ET para análisis de decisiones. Se analiza la construcción del árbol de objetivos necesario para aplicar la metodología desde la perspectiva de tres pilares: económico, ambiental y social, considerando los ODS que están relacionados directamente con la generación de electricidad mediante energía nuclear. Posteriormente se desarrolla la metodología KIND-ET analizando los resultados obtenidos del estudio y se aplican tres extensiones de la metodología KIND-ET como complementos del estudio realizado.

Finalmente, la investigación actual presenta en el capítulo 5 las conclusiones de los resultados obtenidos y se hace la recomendación respecto a cuál es el reactor nuclear óptimo para considerarse para la expansión de energía nuclear en México.

Capítulo 1. Panorama de la energía nuclear en el Mundo

1.1 Factores clave conductores de los sistemas eléctricos actuales

Para asegurar un sistema eléctrico confiable, seguro y sostenible, se requiere considerar diversos factores importantes para su desarrollo, modernización y funcionamiento, entre los cuales se encuentran:

1. Las energías renovables han tenido un aumento considerable en la matriz energética de los últimos años, lo cual es atribuible a la disminución de costos y a bajas o nulas emisiones. El factor de carga es variable para las energías intermitentes, como la energía solar y la energía eólica, como consecuencia no se proporciona un suministro de energía constante y se generan impactos en el sistema eléctrico en cuestiones de variabilidad, despacho y suministro de respaldo.
2. En la actualidad el desarrollo tecnológico ha permitido que el consumo de energía disminuya, ya sea por mejores equipos de generación o aparatos de menor consumo, representando un incremento en la eficiencia energética.
3. La electrificación del sector transporte es relevante, pues es un sector necesario para toda población, aunque actualmente es dominado por los hidrocarburos, la penetración del transporte eléctrico comienza a aumentar, aunque actualmente es costoso de producir, el futuro es favorable.
4. Es bien sabido que los combustibles fósiles siguen siendo los mayores participantes en la matriz energética mundial, pero el gas natural es el que más relevancia ha ganado, debido a las reservas existentes y las que se han descubierto.
5. Un método para disminuir la intermitencia que presentan las energías solar y eólica son los sistemas de almacenamiento de energía, los cuales han presentado disminuciones en sus costos y tienen un futuro económicamente favorable.
6. El sistema de transmisión es de vital importancia para el transporte y suministro de electricidad. Mejorar la interconexión de las redes eléctricas es importante para asegurar la calidad, confiabilidad y disponibilidad de la electricidad.
7. La generación distribuida ha comenzado a tomar importancia y junto con las redes inteligentes, generan cierta independencia y modificaciones en los sistemas eléctricos.
8. Los acontecimientos que envuelven al mundo son factor importante en los sistemas eléctricos, desde la economía que hace variar a los combustibles fósiles, el cambio climático, hasta la pandemia (COVID-19) que se ha atravesado, han afectado a los sistemas eléctricos, así como las estrategias para la transición energética.

9. Disminuir la pobreza energética es un factor clave en los sistemas actuales, donde se requiere aumentar el acceso a los servicios energéticos a precios asequibles, para mejorar así el bienestar y la calidad de vida de la sociedad.
10. El sector energético requiere un desarrollo de la equidad de género en todos los ámbitos, desde el acceso a servicios energéticos, la formación académica y la toma de decisiones.
11. La seguridad energética es necesaria para asegurar el suministro de energía, la cual debe ser sostenible y económicamente accesible. Por lo que el aumento de las energías limpias es importante en los sistemas eléctricos.
12. Los esquemas de financiamiento presentan una gran relevancia al ser la base de la construcción y operación de nuevos proyectos (centrales de generación, parques solares y eólicos, redes de transmisión, etc.). Procurando un sistema financiero flexible y estable acorde a la transición energética y con mayores requisitos de sostenibilidad.
13. Las políticas energéticas generadas son de gran importancia para formación de los sistemas energéticos actuales y futuros, en los cuales las energías limpias y renovables sean las dominantes en la matriz energética, cuidando la armonía entre las estructuras socioeconómicas y la inversión en la transición energética.
14. El desarrollo de capacidades humanas es una pieza fundamental en el sector energético del país para poder brindar generaciones preparadas para los retos energéticos y con una visión a largo plazo para satisfacer las demandas de la población.

1.2 Apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica

Mediante la diversidad de programas y proyectos, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) trabaja con los países miembros promoviendo el uso de la tecnología nuclear en diferentes campos prácticos, en condiciones seguras y con fines pacíficos.

El OIEA brinda apoyo a los países para alcanzar los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que se establecen en la agenda 2030 para el desarrollo sostenible.

“Numerosos países recurren a la ciencia y la tecnología nucleares para contribuir a sus objetivos de desarrollo y poder cumplirlos en ámbitos como la energía, la salud humana, la producción de alimentos, la gestión del agua y la protección del medio ambiente. El uso de estas técnicas contribuye de manera directa a 9 de los 17 ODS”. [3]

México forma parte del OIEA por medio de la división para América Latina y el Caribe, la cual conforman 31 países. Dentro de esta división se ha conformado el Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe (ARCAL), cuya finalidad es promover el uso de tecnología nuclear dentro de lo relacionado con alimentación, salud, medio ambiente, energía, industria y seguridad radiológica.

En materia de energía, el OIEA cuenta con el Proyecto Internacional sobre Ciclos del Combustible y Reactores Innovadores (INPRO, por sus siglas en inglés)². Este proyecto presta apoyo a los miembros

² IAEA, INPRO Collaboration platform. <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/Pages/home.aspx>

para planificación de reactores, ciclos de combustible y actividades de colaboración con el objetivo de impulsar el desarrollo sostenible de sistemas de energía nuclear.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), al ser encargada del sector eléctrico, junto con los organismos de regulación, tiene un organismo de apoyo en el OIEA, debido a la experiencia y retroalimentación que ofrece mediante los instrumentos de planificación y mecanismo de modelización energética.

Dicha asistencia puede generar el desarrollo de recursos humanos, apoyo a la tecnología, operación y seguridad energética. De igual manera, generaliza el uso de diferentes tecnologías de generación eléctrica, por lo cual el diseño de las estrategias de energía cuenta con la posibilidad de incluir o no energía nuclear. En la Tabla 1 se muestran diferentes publicaciones del OIEA que pueden servir de guía y son de ayuda para generar experiencia en futuros proyectos.

Tabla 1. Publicaciones guía del OIEA

PUBLICACIÓN	LINK
Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050	https://www.iaea.org/publications/14786/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050
Country nuclear power profiles 2021	https://www.iaea.org/publications/15047/country-nuclear-power-profiles
Nuclear Power Reactors in the World	https://www.iaea.org/publications/14989/nuclear-power-reactors-in-the-world
INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Safety of Nuclear Reactors	https://www.iaea.org/publications/12298/inpro-methodology-for-sustainability-assessment-of-nuclear-energy-systems-safety-of-nuclear-reactors
Climate Change and the Role of Nuclear Power	https://www.iaea.org/publications/14763/climate-change-and-the-role-of-nuclear-power
The Potential Role of Nuclear Energy in National Climate Change Mitigation Strategies	https://www.iaea.org/publications/15001/the-potential-role-of-nuclear-energy-in-national-climate-change-mitigation-strategies
Planning Enhanced Nuclear Energy Sustainability	https://www.iaea.org/publications/13628/planning-enhanced-nuclear-energy-sustainability
Climate Change and Nuclear Power 2020	https://www.iaea.org/publications/14725/climate-change-and-nuclear-power-2020
Site Evaluation for Nuclear Installations	https://www.iaea.org/publications/13413/site-evaluation-for-nuclear-installations
Management of Nuclear Power Plant Projects	https://www.iaea.org/publications/13499/management-of-nuclear-power-plant-projects

1.3 Situación actual de la energía nuclear en el mundo

Junto con el crecimiento de la población, entre otros factores, la demanda de energía es creciente y se requiere la disponibilidad del suministro eléctrico de manera instantánea en el momento que se demande la electricidad. Es necesario brindar un respaldo a energías renovables como la solar fotovoltaica y la energía eólica en los momentos que dejan de producir, debido a su naturaleza variable respecto a las condiciones climáticas.

Entonces la matriz energética necesita contar con energías de producción continua y de bajas emisiones, para que el sistema eléctrico pueda asegurar el suministro las 24 horas del día. De las cuales podemos mencionar las siguientes:

- Geotermia
- Bioenergía
- Energía nuclear de fisión
- Hidroeléctricas
- Celdas de combustible de hidrógeno
- Energía nuclear de fusión
- Energía de mareas
- Gradiente térmico del agua de mar
- Gradiente salino del agua de mar
- Ciclos combinados a hidrógeno y gas natural

En el particular caso de la energía nuclear, la Figura 1 nos proporciona una visión a nivel mundial de la participación de la energía nuclear en la matriz energética de 1985 a 2022. Aunque la producción de energía nuclear en los últimos doce años se ha mantenido casi constante, debido al balance de la entrada de nuevas plantas y el cierre de las plantas viejas y accidentadas (caso Japón), la contribución porcentual de nuclear en el mix de electricidad mundial ha disminuido debido al crecimiento de la generación basada en carbón, gas natural, eólica y solar.

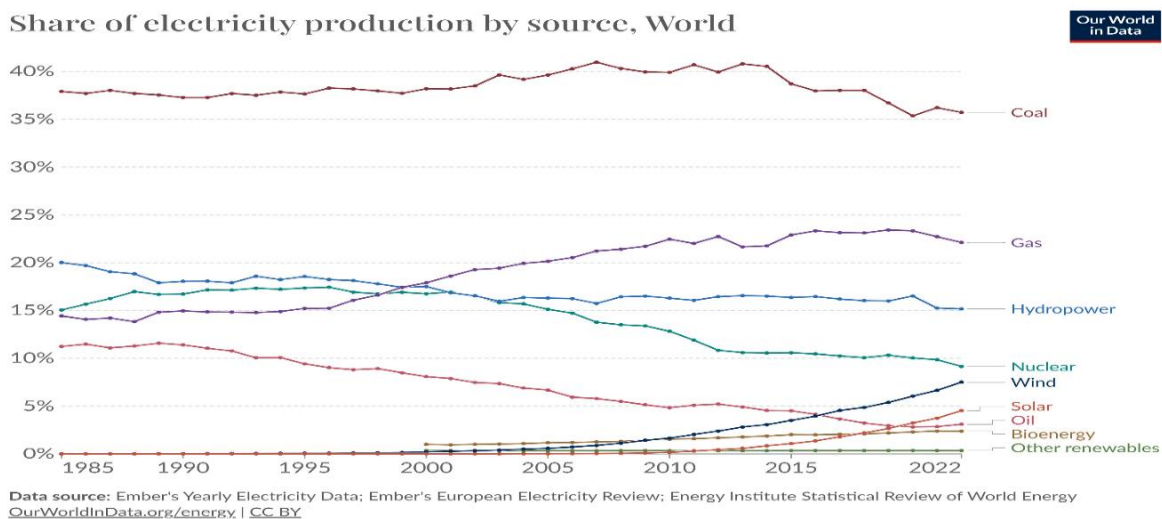


Figura 1. Porcentaje de producción de electricidad en el mundo.

Fuente: Our World in Data, <https://ourworldindata.org/grapher/share-elec-by-source>

Sin embargo, la energía nuclear se posiciona como la segunda fuente limpia que aporta mayor energía a la matriz de generación, en primera posición se coloca la hidroenergía.³ Cabe resaltar que en el periodo 2010-2022 de la producción anual de electricidad partir de carbón se incrementó en 1,832 [TWh], mientras que eólica aumentó 1,793 [TWh] y solar en 1,258 [TWh] en ese periodo.

Actualmente el OIEA, mediante el sistema de información sobre reactores de potencia (PRIS, por sus siglas en inglés), reporta un total de 412 reactores en operación con una capacidad instalada de 370, 170 [MW] (ver Figura 2). [4]

Además, registra 58 reactores en construcción con una capacidad instalada de 60, 207 [MW]. Donde destacan Norteamérica, Europa Oriental y Asia-Lejano Oriente, como las principales regiones con mayor número de reactores en operación. Mientras que las regiones de Asia y Europa-Central y Oriental sobresalen por la cantidad de reactores en construcción. [4]

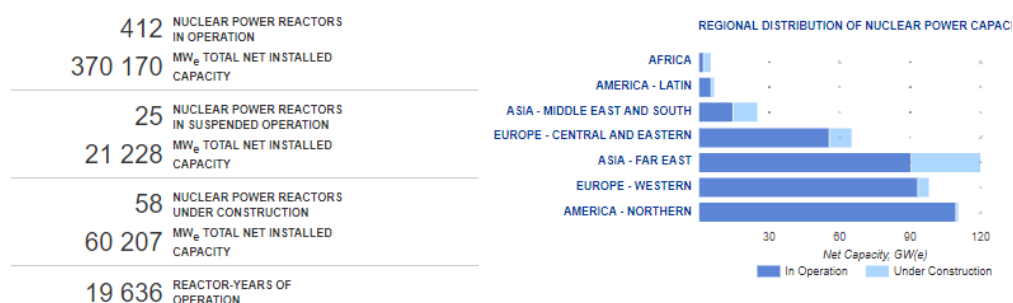


Figura 2. Reactores nucleares en el mundo.

Fuente: Power Reactor Information System, OIEA. <https://pris.iaea.org/pris/Home.aspx>

A nivel mundial Estados Unidos cuenta con el mayor número de reactores en operación (Figura 3). Francia es el país de la Unión Europea que mayor presencia de reactores operando presenta. China es de los países con un alto índice de emisiones de carbono (15.6 GT de CO₂ equivalente en 2023) [5], lo que genera la necesidad de proporcionar estrategias para reducir emisiones, es así que apuestan por la energía nuclear siendo el país con mayor presencia de reactores en operación en Asia y con mayor número de reactores en construcción (Figura 4), destacando que Asia es el continente donde más se apuesta por energía nuclear.

³ Hannah Ritchie and Pablo Rosado (2020) - "Electricity Mix" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/electricity-mix' [Online Resource]

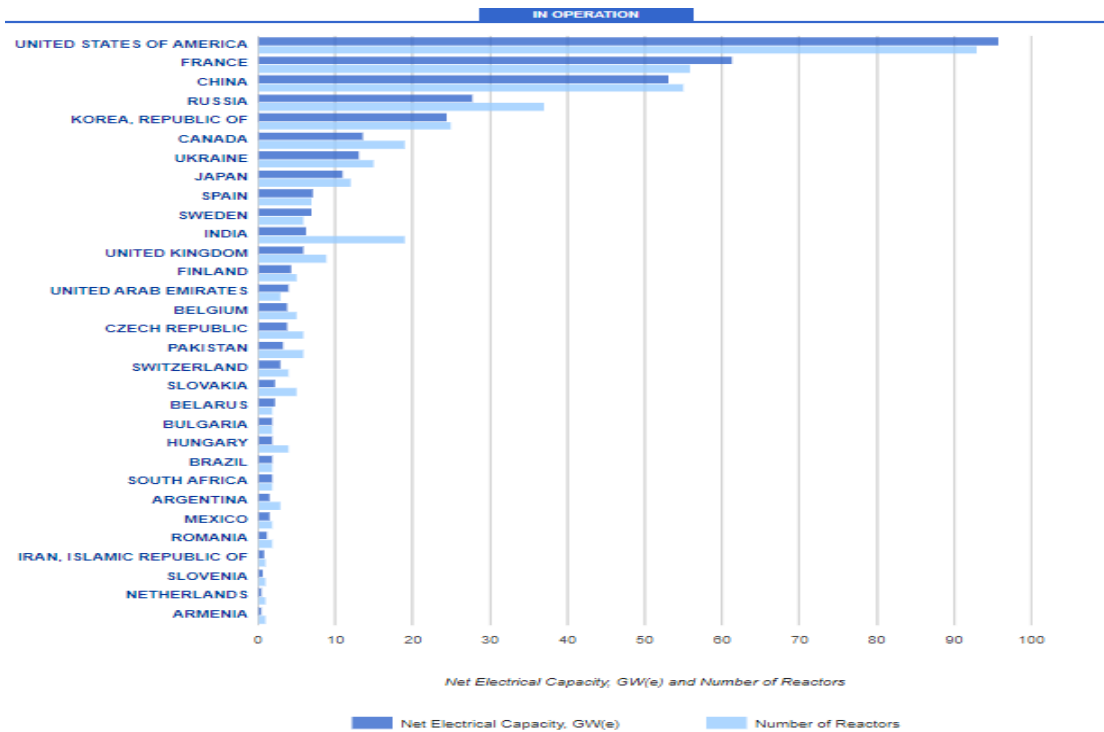


Figura 3. Reactores nucleares en operación por país.

Fuente: Power Reactor Information System, OIEA. <https://pris.iaea.org/pris/Home.aspx>

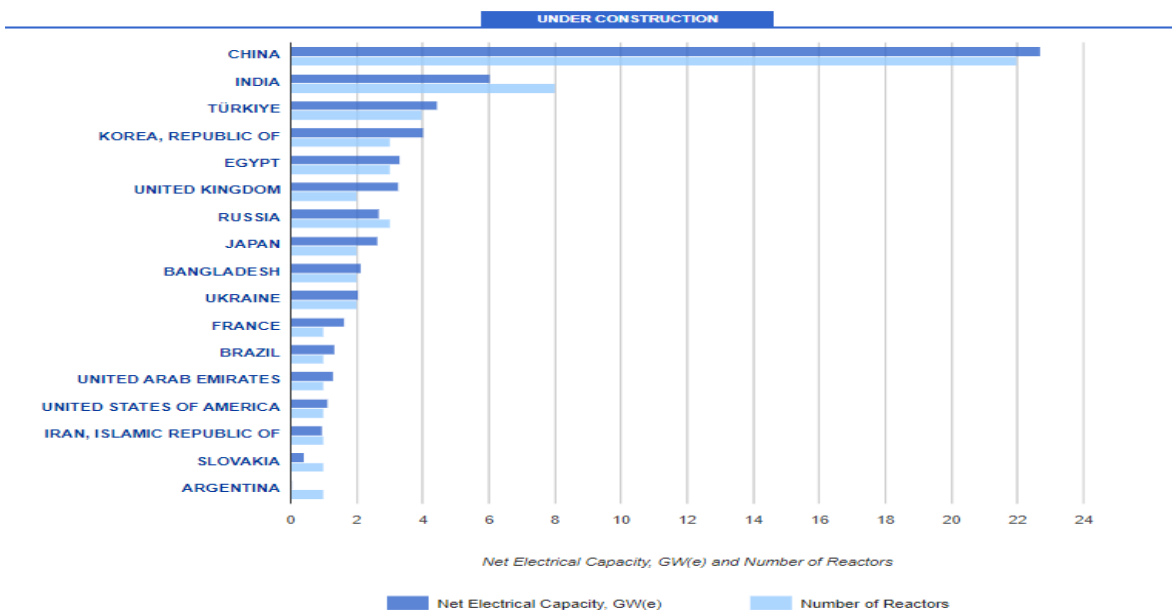


Figura 4. Reactores nucleares en construcción por país.

Fuente: Power Reactor Information System, OIEA. <https://pris.iaea.org/pris/Home.aspx>

Por su lado, el World Nuclear Industry Status Report (WNISR), presentó una evaluación independiente de los desarrollos nucleares en el mundo, elaborada por consultores independientes y expertos interdisciplinarios de diferentes países, reporta para mediados del año 2022 un total de 440 reactores nucleares en operación en 33 países y con un total de 369 [GW] (ver Figura 5). Se

alcanzó un número máximo de reactores en operación en el año 2002 con 438 reactores, manteniéndose en valores similares hasta 2010. [6]

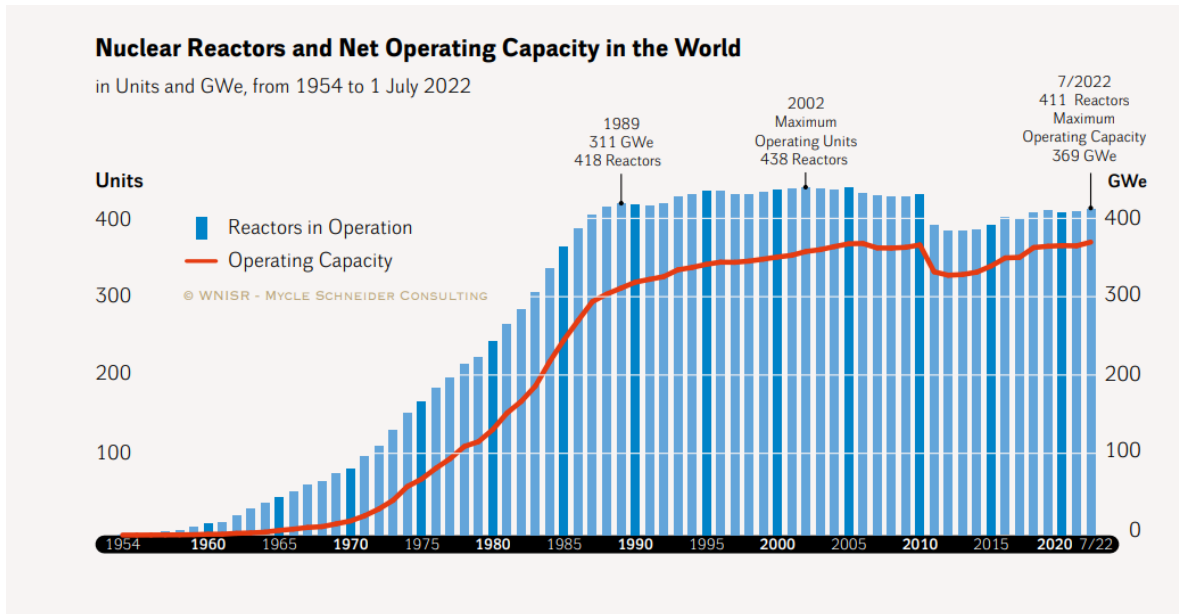


Figura 5. Reactores nucleares y capacidad neta operativa en el mundo.

Fuente: World Nuclear Industry Status Report, 2022. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-v3-hr.pdf>

Sin embargo, aunque en las últimas décadas han disminuido la cantidad de reactores que entran en operación, podemos observar en la Figura 6 que, el balance histórico desde 1954 hasta 2021 arroja números a favor de los reactores que entran en operación pues representan casi tres veces el número de reactores que han visto su cierre de operaciones.

Nuclear Reactor Startups and Closures in the World

In Units, from 1954 to 31 December 2021

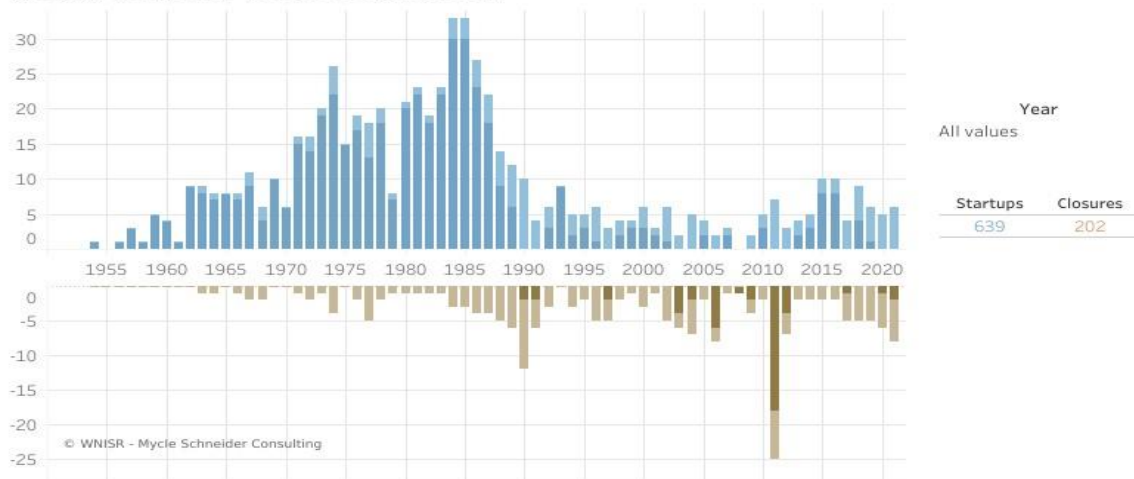


Figura 6. Balance histórico de reactores nucleares.

Fuente: World Nuclear Industry Status Report, 2021. <https://www.worldnuclearreport.org/Highest-Number-of-Reactor-Closures-in-a-Decade.html>

Veinte países firmaron en la cumbre climática COP28 el compromiso de triplicar su capacidad de energía nuclear a 2050. La decisión fue tomada en su mayoría por países europeos y norteamericanos, estableciendo un panorama en el cual la energía nuclear podría cubrir un tercio de las necesidades de electricidad del mundo en 25 años. Las naciones firmantes manifestaron la necesidad de construir más centrales nucleares para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas. [7]

1.4 Energía nuclear limpia y segura

El papel de la energía nuclear en el sistema eléctrico depende del país en cuestión, pues mientras algunos países están invirtiendo en el aumento del suministro de energía nuclear también hay otros países que comienzan a desconectar plantas de generación mediante energía nuclear, con la visión de dismantelar totalmente su capacidad nuclear, tal es el caso de Alemania.

A lo largo de la historia de la generación eléctrica por medio de energía nuclear se ha mostrado gran interés por su implementación, en la Figura 7 se muestra que de la década de 1960 hasta la década del 2000 experimentó un gran crecimiento, y aunque se ha cerrado y abandonado infraestructura de generación eléctrica nuclear, los reactores en activo y los reactores en construcción han otorgado cierta estabilidad, generando un aproximado de 2,610 [TWh] en 2022.

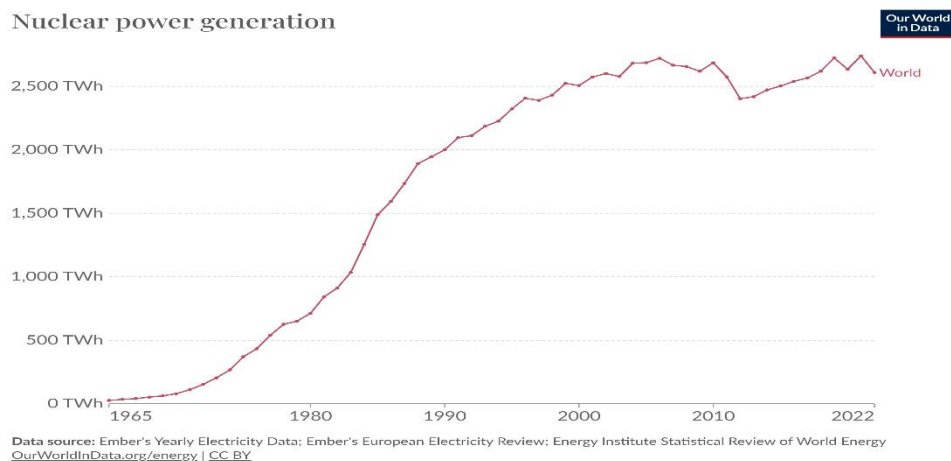


Figura 7. Generación de energía nuclear.

Fuente: Our World in Data, <https://ourworldindata.org/grapher/share-elec-by-source>

Dado que el suministro de electricidad es uno de los factores fundamentales para el desarrollo, la importancia de mantener una generación con bajas emisiones es fundamental para lograr los objetivos de mitigación de cambio climático. Desde el inicio del uso de combustibles, hasta el impulso resultado de revolución industrial y en la actualidad su fuerte presencia en la matriz de generación eléctrica, las emisiones acumuladas son la principal preocupación para lograr mitigar el cambio climático.

Pero no sólo eso, las emisiones conllevan a la contaminación del aire, siendo una parte fundamental para la salud humana, pues de la contaminación del aire derivan enfermedades respiratorias que llevan a muertes prematuras y con ello una necesidad más para la transición a energías limpias y renovables.

Un punto más a favor de las energías limpias y renovables es la seguridad que representan en cuanto a accidentes ocurridos a lo largo de la cadena de producción, desde la extracción y producción de combustibles, el transporte de combustibles, la construcción y operación de las centrales de generación y la distribución de electricidad. La energía nuclear y la energía hidroeléctrica cuentan con costos externos bajos en torno a las tecnologías de generación eléctrica.⁴

Aunque todas las fuentes de energía tienen peligros y efectos negativos, estos difieren en magnitud unos de otros, tanto desde los efectos sobre la salud humana, como los efectos sobre el cambio climático.

En el particular caso de energía nuclear, la principal preocupación mundial es el armamento nuclear que pueden desarrollar los países para su uso potencial durante un conflicto bélico. Junto con los desastres nucleares vividos, la energía nuclear se ha visto mermada en los últimos años. Debido a esto se han desarrollado medidas, estándares y códigos para mejorar la calidad de los reactores nucleares, la seguridad de la infraestructura y la seguridad de su operación. Existen protocolos de protección física de materiales nucleares y acciones multilaterales para la protección de instalaciones nucleares⁵.

Gracias al desarrollo y experiencia para mejorar la seguridad de los reactores nucleares es que la generación por medio de energía nuclear se ha convertido en una de las más seguras y en una de las que menos decesos registra por TWh producido (ver Figura 8).

Derivado del estudio de diversas publicaciones, se han comparado las muertes causadas por tecnologías de generación eléctrica basadas en los combustibles fósiles y las energías limpias y renovables, tomando en cuenta accidentes nucleares como el de Chernóbil, accidentes en operaciones mineras, operación de centrales eléctricas y muertes por contaminación del aire.

En resumidos datos, obtenidos de “Our World in Data” en su publicación sobre energía nuclear: *“la tasa de mortalidad nuclear incluye unas 4000 muertes por el desastre de Chernóbil de 1986 en Ucrania (basado en estimaciones de la OMS); 574 muertes por Fukushima (un trabajador muerto y 573 muertes indirectas por el estrés de la evacuación); y muertes ocupacionales estimadas (principalmente por la minería y la molienda), según lo proporcionado por Markandya y Wilkinson (2007).”* [8]

Un claro ejemplo del progreso en la seguridad de reactores nucleares es el hecho, a pesar de haber sido originados por diferentes cuestiones y ser accidentes diferentes, que los decesos en el accidente nuclear de Fukushima son notablemente menores que los decesos en el accidente de Chernóbil.

Cabe destacar que los accidentes fueron en diferentes épocas, pero desde el accidente en Chernóbil las normas, indicadores y restricciones se volvieron más estrictos, generando así un mayor nivel de seguridad para la generación mediante energía nuclear.

⁴ P. Burgherr, S. Hirschberg. Accident risks in the energy sector: comparative evaluations. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20669892>

⁵ IAEA, Convention on the Physical Protection of Nuclear Material (CPPNM) and its Amendment. <https://www.iaea.org/publications/documents/conventions/convention-physical-protection-nuclear-material-and-its-amendment>

Ahora desde la perspectiva donde las energías limpias y renovables sustituyen a los combustibles fósiles, podemos afirmar que dicha sustitución termina por reducir emisiones contaminantes y por reducir la tasa de mortalidad debida a dichas emisiones.

Entonces tenemos dos puntos a favor, pues las energías más limpias son las energías más seguras en la matriz energética. En la Figura 8 se muestra, para diferentes tipos de energías, del lado izquierdo la tasa de mortalidad por [TWh] para cada tipo de energía y del lado derecho las emisiones de GEI por [GWh]. Analizando el gráfico, la simetría que presenta afirma que las energías más seguras en la matriz energética son las más limpias.

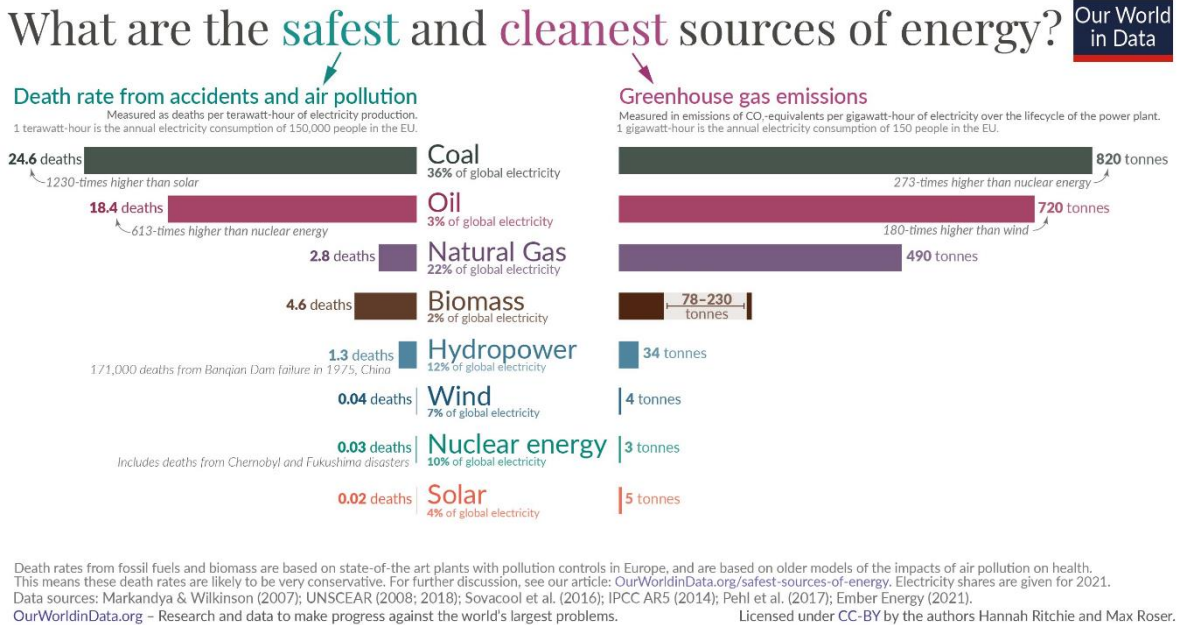


Figura 8. Comparativa de GEI, muertes por accidentes y contaminación del aire.

Fuente: Our World in Data, <https://ourworldindata.org/nuclear-energy#how-many-people-has-nuclear-energy-saved>

Bajo la consideración de la transición a energías limpias y renovables, podemos considerar a la energía nuclear como una de las más seguras y limpias, gracias a que se evitan emisiones asociadas a la quema de combustibles fósiles. En el particular caso de la energía nuclear, es de las energías más seguras y con menor tasa de mortalidad en la matriz de generación, junto con la energía eólica y la energía solar.

Analizando el caso de países en desarrollo, donde los combustibles fósiles son dominantes y donde las energías renovables comienzan a ganar terreno, la flexibilidad de la energía nuclear es el apoyo perfecto para poder cumplir con los objetivos de descarbonización y al mismo tiempo aumentar el desarrollo de los países.

De igual manera el cierre de las centrales nucleares en la actualidad genera la necesidad de compensar la capacidad eléctrica sustraída y la opción más rápida es implementar combustibles fósiles, aunque sea con gas natural, las emisiones van a aumentar y con ello los problemas para la salud y el medio ambiente.

La flexibilidad y el respaldo que puede proporcionar la energía nuclear es un importante punto a favor. Si bien la energía solar y la energía eólica cuentan con gran potencial, su variabilidad dificulta su incorporación a la red para poder transmitirla, dado que la demanda de energía no siempre se encuentra en la misma zona que los recursos para producción de energía.

Hablando de parques solares y eólicos, debido a ser energías difusas, requieren una mayor extensión de terreno que otras tecnologías para la producción de energía eléctrica.

De acuerdo con los datos de la oficina de energía nuclear de los Estados Unidos, se requieren aproximadamente 3,000 millones de paneles fotovoltaicos (tamaño promedio del modelo de silicio) y un aproximado de 431 aerogeneradores (tamaño promedio a escala de servicios públicos) para igualar la producción de 1000[MW] generados mediante energía nuclear. [9]

El tiempo de vida de los parques eólicos y solares es relativamente corto en comparación con otras tecnologías de generación por lo que un problema actual y a futuro es la disposición de los componentes pues no hay un ciclo conjunto de desmantelamiento. La industria de reciclaje que existe no está enfocada a paneles solares y se enfrentan retos en la disposición final de diseños del proceso energético o el reciclaje de componentes.

Por su parte, el sector nuclear cuenta con estrategias definidas para la disposición de combustible gastado y componentes, como lo son: el almacenamiento de combustible gastado en contenedores especiales, repositorios geológicos de combustible o el despliegue de reactores de IV generación para la reducción del volumen de combustible gastado.

La energía nuclear es una excelente forma de generación que puede proporcionar el respaldo necesario a las energías variables presentes en la matriz energética optimizando el uso de suelo y brindando un tiempo de vida largo, pudiendo operar entre 60 y 80 años, considerando la posibilidad de operar hasta 100 años dependiendo del estado de la evaluación de las instalaciones nucleares. Además de ser una fuente de generación segura y contribuir con la mitigación del cambio climático.

1.5 La participación de la energía nuclear en los objetivos de desarrollo sostenible

Hablando de los objetivos de desarrollo sostenible, necesitamos saber qué es el desarrollo sostenible, definido por primera vez en 1987 en el informe de la Comisión Mundial sobre desarrollo y Medio Ambiente *Nuestro Futuro Común (informe Brundtland)*:

“El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. [10]

Para asegurar un desarrollo sostenible se necesita una manera diferente de producción y consumo, con mayor conciencia y responsabilidad, para asegurar una mayor calidad de vida de las generaciones presentes y futuras. Es así como resaltan tres pilares para lograr la sostenibilidad: el ambiente, la economía y política-social.

El nexo entre el desarrollo humano y el consumo de energía es claro, aún más visible en países en vías de desarrollo, donde el país mejora sectores como salud, educación, vivienda, entre otros factores de bienestar social, mediante un mayor consumo de energía.

Entonces, el acceso a servicios energéticos con tecnología moderna, precios asequibles y con seguridad energética coloca al sector energético como la base para lograr el desarrollo de la humanidad.

Sin embargo, esto significa también un aumento en el consumo de energía, lo que nos lleva a buscar la mejor manera para suministrar esta demanda de energía y lograr el desarrollo de los países sin aumentar el nivel de emisiones.

Ya se ha visto que cada una de las tecnologías existentes en generación eléctrica tiene distintos riesgos para la humanidad y el medio ambiente. Las energías limpias y con bajas emisiones no representan mayor riesgo ambiental durante su operación, sin embargo, la responsabilidad cae en las emisiones y desechos que se generan en los procesos de construcción, mantenimiento y desmantelamiento, aunque son menores en comparación con lo generado por energías en base de combustibles fósiles.

Con esto en mente, la energía nuclear, junto con la energía hidroeléctrica, es una de las fuentes de energía, comprobada, baja en carbono, con alta densidad energética y con un gran nivel de confiabilidad dentro de la matriz de generación.

Es importante que la energía nuclear obtenga mayor relevancia en los esfuerzos para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, proporcionar el respaldo necesario a las energías renovables variables y avanzar hacia los objetivos de mitigación del cambio climático.

La expansión del uso de energía nuclear asegura el suministro eléctrico con tecnologías modernas, aumenta el acceso a la electricidad de la población que no cuentan con el servicio, contribuye con la reducción de emisiones, reduciendo el impacto ambiental y el impacto en la salud humana. De igual manera, la incorporación de tecnología nuclear permitirá la incorporación de sistemas digitales avanzados en las próximas décadas otorgando variedad de información en la IV revolución industrial⁶.

Desde la perspectiva del pilar ambiental, la energía nuclear atiende directa e indirectamente temas como la contaminación ambiental, protección de ecosistemas, uso de la tierra y agua. La mayor parte de las emisiones provienen de la generación de electricidad mediante la quema de combustibles fósiles, en cuanto a la energía nuclear, la emisión de CO₂ es mínima y se genera en el proceso de construcción, en la producción y transporte de cemento, acero y distintos componentes, así como en las emisiones energéticas derivadas de la cadena de procesos para fabricar y transportar el combustible.

El sector eléctrico requiere competir con otros sectores, como lo es la agricultura, la industria, la vivienda, por el uso de recursos como el uso de tierra. La energía nuclear representa una opción menos invasiva para los ecosistemas, ya que produce una gran cantidad de energía ocupando menos cantidades de terreno.

De igual manera, las centrales de generación eléctrica compiten con los diferentes sectores por el uso de agua, teniendo como prioridad el uso del agua para consumo humano y para la producción

⁶ Florencia de los Angeles Renteria del Toro, Chen Hao. Digitalization as an aggregate performance in the energy transition for nuclear industry. 27 November 2023

de alimentos. Sin embargo, una alternativa más para el uso de energía nuclear que comienza a ser viable es la desalinización de agua de mar, la cual es de gran ayuda para satisfacer la creciente demanda.

En la perspectiva del pilar social, la energía nuclear aporta energía baja en emisiones contaminantes, las cuales, entre otros problemas, originan problemas respiratorios que derivan en decesos por exposición a la contaminación ambiental.

Su confiabilidad, gran capacidad de generación eléctrica y la seguridad durante su operación son factores que convierten a la energía nuclear en una opción para el reemplazo de combustibles fósiles y para el respaldo de energías renovables variables.

El desarrollo en la calidad de vida de la sociedad va acompañado de la energía, es necesario satisfacer la demanda de energía y así mejorar la calidad de vida de la sociedad, claramente sin aumentar las emisiones contaminantes en el proceso.

Para poder lograr el desarrollo en la calidad de vida, el acceso de toda la población a la energía es necesario, esa energía se requiere sea confiable, segura y sin generación de emisiones, por lo que la energía nuclear representa un soporte importante para el desarrollo de la calidad de vida. Es importante señalar que existen usos no energéticos de tecnología nuclear que tienen contribuciones en distintos sectores como el sector salud, la industria y la agricultura.

El tiempo de operación de una planta nuclear puede llegar a los 60 años, con la posibilidad de extender ese tiempo gracias a la renovación de tecnologías. Desde el momento de su construcción hasta el final de su ciclo de vida, se crean empleos en todos los niveles de la cadena de producción, empleos sólidos, duraderos y de buena remuneración económica.

Dichos empleos se generan en todos los niveles y en diferentes áreas, pues no sólo se crean empleos para la operación de una central, la capacidad de generación de capital humano va desde estudios y construcción de una central, la obtención y suministro de combustible, administración, auditorías, consultorías, generación y distribución eléctrica, creando así empleos directos e indirectos gracias al uso de energía nuclear.

Para el pilar económico, sabemos que la energía nuclear es de las más costosas en cuestiones de costos de inversión, sin embargo, el uranio que se utiliza como combustible presenta un mercado con costos de combustible menores y más estables en comparación con los combustibles fósiles, siendo reflejado en los precios al consumidor, como se vive en la crisis en Europa.

Dicha estabilidad en los precios del combustible nuclear genera a su vez consistencia en los precios de generación eléctrica, lo que representa un respaldo para la volatilidad que presentan los mercados de combustibles fósiles.

La implementación de los reactores modulares es un aspecto que tiene una tendencia a reducir los costos de construcción de las centrales de generación y a utilizar menos recursos, como lo son el concreto, acero y diferentes metales para la construcción y el equipamiento de las centrales.

Los objetivos de desarrollo sostenible se adoptaron el 25 de septiembre de 2015 [11]. Los principales propósitos de los ODS es erradicar la pobreza, aumentar el nivel de salud, educación, bienestar y la igualdad de género, sin dejar de lado el cuidado del medio ambiente y la prosperidad de la sociedad.

Se cuenta con 17 objetivos (ver Figura 9), los cuales tienen metas específicas para su acción en torno a la agenda 2030.

Las Naciones Unidas presentan una serie de acciones individuales a diferentes niveles de la vida diaria en su página <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/takeaction/>, que van desde acciones de ahorro de energía, como desconectar aparatos que no estén en uso, apagar luces, etc.; hasta acciones sociales como un mejor nivel de salud, educación de calidad e impulsar la lucha de igualdad de género.

Dentro de lo más importante es el mantenernos informados y fomentar un cambio en la mentalidad consumista, como individuos podemos adoptar los ODS y adaptarlos a nuestro entorno, si cambiamos la manera en que consumimos, nos transportamos, la forma de nuestro pensamiento y la forma en que nos alimentamos, podemos contribuir con los ODS de manera individual.



Figura 9. Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Fuente: Objetivos de Desarrollo Sostenible, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

La tecnología nuclear tiene contribuciones directas e indirectas en cada uno de los ODS, dicha participación va desde herramientas y técnicas aplicadas a diferentes sectores. Dentro del sector salud, los avances en medicina nuclear (radiofármacos), técnicas nucleares y de irradiación han mejorado el tratamiento y la detección de problemas de salud, como problemas cardiovasculares y el cáncer.

El uso de técnicas isotópicas ha logrado aportes en la agricultura, como la reducción de plagas y mejora en cultivos; alimentación, mediante el uso de isótopos para el rastreo de nutrientes en el cuerpo humano; uso de tierra y gestión de recursos hídricos.

Es debido a sus características de la generación eléctrica mediante tecnología nuclear que los ODS donde tiene mayor presencia son aquellos relacionados con la dimensión económica, proporcionando estabilidad a los precios de generación eléctrica, generando empleos a lo largo de la cadena de producción y aportando al crecimiento económico.

En cuanto a la dimensión social, colabora en desarrollo de la sociedad incrementando la calidad de vida por medio de energía segura, asequible y no contaminante; es así como, en la dimensión ambiental, la capacidad de generación en áreas reducidas colabora con la preservación de ecosistemas y de manera más importante, el no generar emisiones contaminantes contribuye significativamente con la mitigación del cambio climático.

La energía nuclear desarrolla presencia en los ODS de manera directa en:

- ODS 1. Fin de la pobreza

De manera global, millones de personas carecen de acceso a electricidad y otros miles cuentan con servicios deficientes. Aumentar el acceso a la energía representa mejoras en la calidad de vida de la sociedad, que se traduce en calidad de salud, alimentación, educación, saneamiento y fuentes de trabajo digno.

La energía nuclear participa en aliviar la pobreza debido a ser una energía confiable, capaz de suministrar energía de manera continua y sin interrupciones, energía necesaria para satisfacer la demanda energética de la sociedad.

- ODS 4. Educación de calidad

Dentro de la industria nuclear, la captación de talento en educación superior representa proyectos para el desarrollo de capital humano con una amplia capacitación para la construcción, operación y mantenimiento de las plantas nucleares.

De igual manera las diferentes universidades en el mundo preparan día a día profesionales con las habilidades, capacidades y conocimientos requeridos para incursionar en la industria nuclear, que junto con patrocinios como el del OIEA a través de las contribuciones de los países miembros permite a estudiantes asistir al curso de verano de la Universidad Nuclear Mundial (WNU, por sus siglas en inglés) dentro de otros programas, conforman una red de formación para los futuros integrantes de la industria.

- ODS 5. Igualdad de género

El acceso a la energía es un factor importante en la lucha de desigualdades y en la igualdad de género. Proporciona mayor cantidad de oportunidades para que las mujeres tengan más posibilidades de desarrollo.

La educación en todos los niveles, junto con la capacitación en la industria logra disminuir la brecha de género existente en la sociedad. El suministro de energía confiable proporciona la alimentación necesaria para el hogar, logrando así contribuir con las amas de casa, uno de los oficios menos valorados y remunerados en la sociedad.

Así mismo el electrificar y mejorar el acceso en zonas que no cuentan con servicios básicos impulsa el desarrollo, la salud y la educación disminuyendo la brecha de género. Es importante garantizar el acceso a electricidad confiable y limpia para que desaparezca la disparidad de género.

- ODS 6. Agua limpia y saneamiento

La demanda de agua limpia es creciente y su suministro es clave para el desarrollo de la sociedad. Además de la generación eléctrica, los reactores nucleares lograrían ser una fuente de agua limpia mediante el uso del calor generado (cogeneración nuclear) en el proceso de desalinización de agua de mar.

Este proceso permite la obtención de agua limpia, donde a grandes rasgos el calor generado se utiliza para hervir agua del océano, logrando condensar el vapor sin sal y pudiendo devolver dicha sal al océano. Al no emitir gases contaminantes, como se hace en plantas de desalinización por medio de combustibles fósiles, se obtiene agua limpia que contribuye para resolver problemáticas de escasez de agua.

- ODS 7. Energía asequible y no contaminante

En un mundo donde la energía eléctrica está presente en todas las actividades de la sociedad, el aumento de la demanda es inminente debido a un crecimiento de la población, junto con la necesidad del acceso a servicios eléctricos confiables y asequibles es que se vuelve vital la transición a energías limpias y renovables para lograr la mitigación del cambio climático sin afectar el desarrollo de la población.

De la mano con el impulso de los reactores nucleares modulares, la energía nuclear se vuelve una opción de generación asequible para el sector energético. Al igual que la cogeneración con combustibles fósiles, la cogeneración nuclear es una opción limpia que emplear por el uso del calor generado en diferentes actividades de la industria.

- ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico

El trabajo es parte importante del crecimiento y desarrollo de la población, la industria nuclear genera empleos desde la construcción hasta el final del su ciclo de vida de las plantas nucleares, empleos sólidos, duraderos y de buena remuneración económica.

Todas las áreas se ven involucradas en la generación de empleos, pues la operación de una central, la capacidad de generación de capital humano va desde estudios y construcción de una central, la obtención y suministro de combustible, administración, auditorías, consultorías, generación y distribución eléctrica, crean empleos directos e indirectos gracias al uso de energía nuclear.

De igual manera, la inversión en proyectos nucleares involucra desarrollo de infraestructura que necesariamente otorga un aporte en el desarrollo económico local y nacional. También es capaz de proporcionar estabilidad económica al sector energético debido a la poca volatilidad del precio del combustible, logrando contrarrestar el impacto en los precios de generación eléctrica cuando se dispansen los precios de los combustibles fósiles.

- ODS 9. Industria, innovación e infraestructura

La energía nuclear suministra electricidad confiable y limpia que respalda a una industrialización sostenible siendo capaz, además, de proporcionar calor para diferentes

usos como calefacción, desalación de agua, producción de hidrógeno, calor de proceso para industria metalúrgica, fabricación de vidrio y cemento.

La innovación en el diseño de los reactores nucleares permite la flexibilidad de su ubicación para operación, facilitan el armado y genera demanda en las cadenas locales de suministro productoras de componentes requeridos para su construcción.

- ODS 10. Reducción de las desigualdades
Millones de personas en el mundo carecen de acceso a servicios de energía, que como consecuencia aumenta la brecha social existente. Aumentar el acceso de energía contribuye en el desarrollo de los países, mejorando la calidad de vida e impulsando la economía, mayormente en los países que están en desarrollo.

En conjunto con la estabilidad de precios que proporciona en el sector eléctrico, pues los precios de generación nuclear tienen menos influencia de la volatilidad en los precios de los combustibles fósiles, la energía nuclear ayuda a disminuir la brecha social y proporcionar igualdad de oportunidades para la sociedad.

- ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles
La electrificación de las ciudades es necesaria para disminuir la contaminación del aire, electrificar el transporte y electrificar diversos sectores que actualmente dependen de los combustibles fósiles. Es entonces que la energía nuclear proporciona la electricidad necesaria para respaldar la electrificación de las ciudades y de las zonas más remotas a las grandes ciudades.

La electrificación del transporte es un sector importante dentro de la planeación de las ciudades sostenibles, pues con ello disminuiría la emisión de gases contaminantes, pero se requiere ampliar la infraestructura para la carga de autos eléctricos, aumentando la demanda de energía, la cual requiere ser limpia para tener un círculo electrificado, pues no es conveniente contar con un transporte electrificado si la energía suministrada proviene de combustibles fósiles.

- ODS 12. Producción y consumo responsables
La generación eléctrica actual es mediante combustibles fósiles, si bien es necesario cambiar la mentalidad consumista de la sociedad, mejorar la eficiencia de los equipos de consumo final, la energía nuclear es parte importante para una producción responsable.

La energía nuclear tiene la capacidad de generar grandes cantidades de energía eléctrica reduciendo los suministros básicos utilizados por unidad de energía generada. De igual manera, el potencial de reciclaje del combustible nuclear utilizado otorga una producción de energía más responsable.

- ODS 13. Acción por el clima
Los estragos del cambio climático ya se hacen presentes en la actualidad, combatir el cambio climático se ha vuelto una preocupación mundial y es necesario tomar acciones inmediatas.

En el sector eléctrico, la energía nuclear proporciona una alternativa de generación limpia, con la capacidad de satisfacer la demanda y respaldar a las energías renovables variables. Y de la mano con la ausencia de emisiones, ayuda con la descarbonización del sector.

Con el uso de reactores modulares pequeños, la huella de carbono de la energía nuclear se ve disminuida, aportando una alternativa de energía limpia que contribuye con la mitigación del cambio climático.

- ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres
Nuestro planeta se ha visto modificado drásticamente a consecuencia de las actividades humanas. Desde el uso de tierra para vivienda, industria, agricultura y ganadería, los recursos de la tierra han sido mermados, dejando de ser sostenibles pues la capacidad de regeneración de los recursos se ha visto rebasada por el consumo.

La deforestación para consumo de madera, uso de suelo para vivienda, industria, extracción de combustibles de la mano con la desertificación afecta a los ecosistemas y ponen en riesgo los bosques del mundo, principales “pulmones” de nuestro planeta, siendo parte importante para la mitigación del cambio climático.

La energía nuclear requiere menor cantidad de área para la generación de energía, comparada con otras fuentes de generación bajas en carbono. Con la implementación de reactores modulares pequeños, se optimizan las áreas destinadas para centrales de generación, ocupando menores áreas por unidad de generación y dejando mayor ocupación de tierra para la regeneración de la capacidad de absorción de emisiones del planeta y favoreciendo los servicios ecosistémicos.

- ODS 16. Paz, justicia e instituciones solidas
La preocupación más grande en torno a la energía nuclear es la construcción de armas nucleares que puedan utilizarse en un conflicto bélico. Sin embargo, los programas nacionales e internacionales de desarrollo de energía nuclear contribuyen con la paz del mundo jugando un papel importante en la no proliferación de armas nucleares.

Los países con proyectos de energía nuclear están comprometidos con el uso pacífico de tecnología nuclear y con la cooperación con agencias internacionales, logrando así prevenir la propagación de las armas nucleares, fomentar la cooperación en los usos pacíficos de la energía nuclear y promover el objetivo del desarme nuclear y el desarme general y completo⁷..

⁷ El OIEA y el tratado sobre la no proliferación. <https://www.iaea.org/es/temas/el-oiea-y-el-tratado-sobre-la-no-proliferacion>

- ODS 17. Alianzas para lograr los objetivos.
Distintas organizaciones, como lo es el OIEA, trabajan en conjunto con los miembros que lo integran para ayudar con el cumplimiento de los ODS. De igual manera las alianzas con la industria nuclear permiten que la tecnología nuclear se convierta en un puente para alcanzar los ODS.

La experiencia de trabajo entre las organizaciones y los distintos países permiten que la tecnología nuclear llegue a países en desarrollo, permitiendo así mejoras en el desarrollo y calidad de vida de la población, además de impulsar y brindar orientación en la toma de decisiones y la planeación de los países.

Capítulo 2. Panorama de la energía eléctrica en México

2.1 Generación eléctrica en México

En México, el sector de generación eléctrica cuenta con una diversificación en la generación de energía eléctrica, donde la mayor parte de la generación del Sistema Eléctrico Nacional proviene de centrales de generación funcionales a partir de combustibles fósiles, compuestas por tecnologías de generación como carboeléctrica, ciclo combinado, combustión interna, termoeléctrica convencional y turbogás.

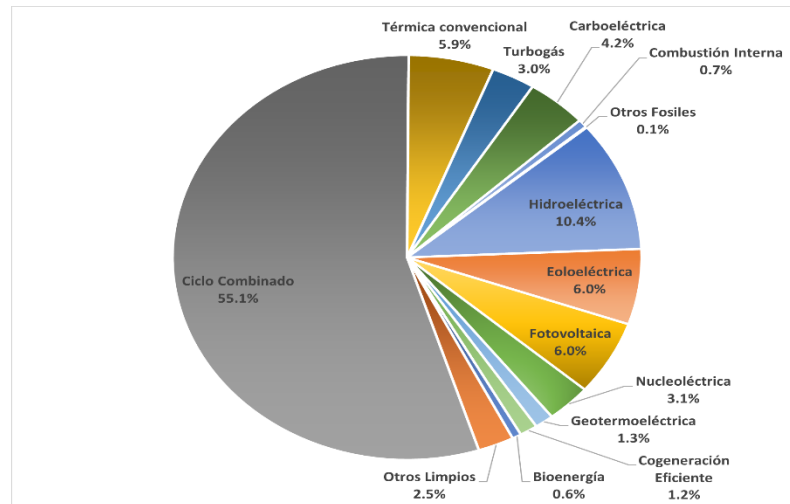


Figura 10. Generación eléctrica del SEN por tipo de tecnología.
Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PRODESEN 2023-2037”

En el año 2022 la generación de energía eléctrica en el país fue de 340,713 [GWh], generando el 55.1% con ciclos combinados y un total de 31.2% de generación eléctrica con energías limpias, donde dominan la generación hidráulica con 10.4%, la generación eoloeléctrica y la generación solar fotovoltaica con 6.0% cada una (ver Figura 10). [12]

En la Tabla 2 podemos ver la evolución de la generación eléctrica del SEN donde destaca la presencia del ciclo combinado como la tecnología principal de generación con cantidades superiores a los 180,000[GWh] en los últimos tres años. De igual manera, la generación por medio de tecnologías basadas en combustibles fósiles convencionales supera el 70% de la generación total.

Es importante considerar expandir la generación por medio de energías limpias, pues es importante la diversificación de la matriz energética del país dado que la generación con ciclo combinado sobrepasa el 50% de la generación total y los combustibles convencionales el 70%, generando una matriz energética basada y dominada por combustibles fósiles, especialmente el ciclo combinado.

Sin embargo, aunque en menor porcentaje, la penetración de las energías renovables ha aumentado durante el periodo de 2018-2022, que de la mano con las energías limpias superan el 20% de la generación total. Siendo notable el aumento de la generación eléctrica de las energías renovables como lo son la energía eólica y la energía solar fotovoltaica, las cuales, junto con la energía hidroeléctrica, son las de mayor participación en la sección de energías renovables. [12]

Tabla 2. Evolución de la generación total eléctrica 2018-2022 [GWh]

Tecnología	2018	2019	2020	2021	2022
Hidroeléctrica Total	32,234.10	23,602.40	26,817.00	34,717.20	35,558.90
Hidroeléctrica de Embalse Mayor	26,442.50	18,299.80	21,235.50	29,668.10	30,390.90
Hidroeléctrica Menor	5,791.60	5,302.60	5,581.50	5,049.00	5,168.00
Geotermoeléctrica	5,064.70	5,060.70	4,574.60	4,242.90	4,412.70
Eoloeléctrica Total	12,435.30	16,726.90	19,702.90	21,074.90	20,528.80
Eoloeléctrica	12,435.30	16,726.90	19,702.90	21,074.90	20,317.20
Eoloeléctrica-Abasto Aislado					209.4
Eoloeléctrica-Generación Distribuida					2.1
Fotovoltaica Total	3,211.70	9,964.30	15,835.60	20,194.90	20,342.00
Fotovoltaica	2,176.30	8,393.70	13,527.70	17,069.00	16,277.70
Fotovoltaica Generación Distribuida	1,018.20	1,564.80	2,303.60	3,110.30	4,049.30
Fotovoltaica-Abasto Aislado	1.4	4.4	4.4	15.6	15
Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO)	15.8	1.5	0	0	0
Bioenergía Total	1,989.20	1,866.50	2,206.50	1,595.60	2,141.30
Bagazo de Caña	1,578.80	1,476.30	1,583.20	1,374.10	1,918.20
Biogás	213.3	241.2	526.7	176.1	153.8
Biogás-Generación Distribuida					38.9
Relleno Sanitario	125.6	110.9	67.4	16.2	
Licor Negro	71.4	38.1	26.4	24.8	23.7
Biomasa	0	0	2.8	4.3	3.4
Biomasa-Generación Distribuida					3.3
RENOVABLES TOTAL	54,934.90	57,220.80	69,136.60	81,825.40	82,983.60
Nucleoeléctrica	13,200.30	10,880.70	10,864.30	11,605.50	10,539.50
Frenos Regenerativos	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
Cogeneración Eficiente Total	2,424.60	3,378.20	4,295.30	3,415.50	4,204.10
Ciclo Combinado	987.7	1,887.20	2,660.50	2,042.90	2,647.90
Abasto Aislado-C.C y C.I	115	119.4	107.1	66.1	67.6
Combustión Interna	77.9	78.7	88.9	75.5	69.4
Turbogás	1,244.10	1,292.90	1,438.70	1,231.00	1,419.20
Termoeléctrica Convencional			0	0	0
Energía libre de Combustible Fósil					7,502.10
Energía Adicional por Enfriamiento Auxiliar					925.8
Baterías					12.3
LIMPIAS NO RENOVABLES	15,628.60	14,262.60	15,163.10	15,024.60	23,187.40
LIMPIAS TOTAL	70,563.40	71,483.40	84,299.80	96,850.10	106,171.00
Porcentaje	22.50%	22.20%	26.60%	29.50%	31.20%
Ciclo Combinado	163,876.70	175,506.30	185,637.80	186,715.10	187,574.30
Térmica Convencional	39,344.70	38,019.60	22,405.50	22,196.20	20,000.60
Térmica Convencional-Abasto Aislado	45	38.1	40.2	45.2	43.5
Turbogás	9,507.60	10,903.80	8,663.90	11,149.50	10,093.00
Turbogás. Abasto Aislado	155.4	148.7	160.2	250.4	157.7
Combustión Interna	2,588.70	3,187.40	2,841.40	2,120.60	1,820.20
Combustión Interna-Abasto Aislado	195.9	313.8	363.4	379.3	411.8
Carboeléctrica	27,347.00	21,611.00	12,525.10	8,704.10	14,193.80
Cogeneración					
Cogeneración-Abasto Aislado	354	372.2	331.2	187.5	167.5
Importaciones					79.2
CONVENCIONALES FOSILES TOTAL	243,414.80	250,101.00	232,968.70	231,747.90	234,541.80
Porcentaje	77.50%	77.80%	73.40%	70.50%	68.80%
TOTAL	313,978.20	321,584.40	317,268.50	328,598.00	340,712.70

Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PRODESEN 2023-2037"

En cuanto a generación nuclear, en el periodo de 2018-2022, la generación se mantuvo en valores entre 10,000[GWh] y 13,000 [GWh] suministrada por la única central nuclear ubicada en Veracruz, sin embargo, es un porcentaje mínimo de aproximadamente 3% de la generación total del país. [12]

Pues de igual manera, la capacidad instalada no ha presentado aumento, manteniendo solo la capacidad de 1,640 [MW] instalados que se distribuyen en las dos unidades de generación de la central nuclear de Laguna Verde.

En la Tabla 3 se muestra la capacidad instalada durante un periodo de cuatro años 2019-2022, donde al cierre del 2021 la capacidad instalada era de 86,153 [MW] y aumento a 87,130 [MW] para el año 2022, generando adiciones principalmente en ciclo combinado, eólica y fotovoltaica (ver Figura 11), para tener un total de energía renovable de 26,899 [MW], que con la suma de la energía limpia (energía nuclear y cogeneración eficiente), se vuelve en un total de generación de energía limpia de 30,812 [MW] para un 35.76% de capacidad instalada de energías limpias al 2021. [12]

Tabla 3. Capacidad instalada del SEN [MW]

Tecnología	2019	2020	2021	2022
Hidroeléctrica	12,612	12,612	12,614	12,613
Geotermoeléctrica	899	951	976	976
Eoloeléctrica	6,050	6,504	6,977	6,921
Fotovoltaica	3,646	5,149	5,955	6,535
Bioenergía	375	378	378	408
Suma energía limpia renovable	23,589	25,594	26,899	27,453
Nucleoeléctrica	1,608	1,608	1,608	1,608
Cogeneración Eficiente	1,710	2,305	2,305	2,308
Suma energía limpia no renovable	3,318	3,913	3,913	3,916
Total capacidad Energía Limpia/%	26,900/34.3%	29,506/35.5%	30,812/35.8%	31,369/36%
Ciclo combinado	30,402	31,948	33,640	34,413
Térmica convencional	11,831	11,809	11,793	11,343
Turbogás	2,960	3,545	3,744	3,815
Combustión interna	891	850	701	728
Carboeléctrica	5,463	5,463	5,463	5,463
Total	78,447	83,121	86,153	87,130

Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PRODESEN 2023-2037”

Si bien, la capacidad instalada se ve dominada por los combustibles fósiles, el porcentaje de tecnología de generación de energía limpia y renovable representa un avance en la penetración de dichas tecnologías, dejando ver la oportunidad de impulsar las energías limpias y renovables como la energía geotermoeléctrica, que no ha presentado mayores adiciones de capacidad instalada.

Derivado de lo anterior, en la Figura 11 se muestra el porcentaje de capacidad instalada en el año 2022 donde tecnologías como ciclo combinado y la térmica convencional son las de mayor porcentaje en la capacidad instalada.

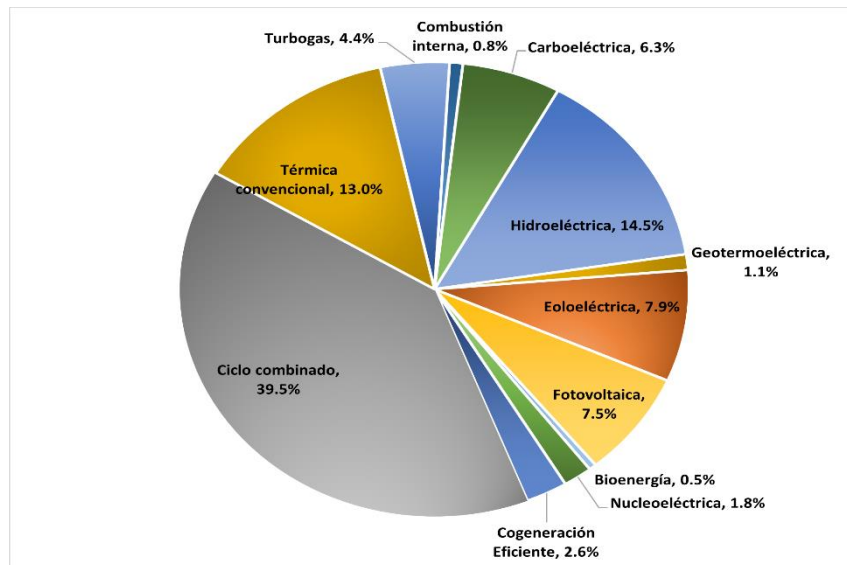


Figura 11. Capacidad instalada del SEN por tipo de tecnología.
Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PRODESEN 2023-2037”

El potencial de generación mediante energías renovables y energías limpias otorga un panorama amplio para los inversionistas en el desarrollo de proyectos de generación limpia para aumentar la diversificación de la matriz energética de México, disminuir el consumo de combustibles fósiles y contribuir con la mitigación del cambio climático.

En el desarrollo de la matriz energética actual, la energía nuclear no ha presentado mayor desarrollo, manteniendo la misma capacidad instalada durante varios años e incluso no se consideran proyectos de ampliación de capacidad instalada en el corto plazo.

2.2 Experiencia nuclear en México

La participación de plantas nucleares en la matriz energética otorga la posibilidad de diversificar las tecnologías de generación eléctrica, la experiencia y capacidad probadas, a nivel nacional, respaldan la generación nuclear como una alternativa en centrales de gran capacidad de generación con bajas emisiones contaminantes.

El interés nacional por el uso de energía nuclear se considera oficial con la creación, en 1956, de la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), organización que fue encargada de todas las actividades nucleares en el país.

En 1966 surge el proyecto para la creación de la primera central de generación nucleoeléctrica, dirigido por CNEN y CFE, para 1969 se hizo la licitación para diseños de centrales nucleares con una capacidad de 600 [MWe]. En el año de 1976 se empezó la construcción de la central nuclear de Laguna Verde, que incluía dos reactores BWR, del fabricante General Electric, con una capacidad de 655 [MW]. [13]

La CNEN se convirtió en el Instituto Nacional de Energía Nuclear (INEN), que posteriormente se derivó, en 1979, en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Uranio Mexicano (URAMEX) y la Comisión Nacional de Seguridad y Salvaguardias Nucleares (CNSNS). [13]

Mediante la Secretaría de Energía, el gobierno mexicano, se encarga de la disposición de desechos radiactivos y combustibles nucleares. México trabaja en conjunto con el OIEA a través de la seguridad en la gestión del combustible gastado y seguridad en la gestión de desechos radiactivos.

En cuanto a investigación y desarrollo, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) cuenta con un reactor de investigación Triga MARK-III, de igual manera, la Universidad Autónoma de Zacatecas y el Instituto Politécnico Nacional cuentan con un ensamble subcrítico Chicago Modelo 9000 utilizado para capacitaciones.

Además, se cuenta con la participación conjunta en diferentes programas de la OIEA cuya finalidad es promover el uso de la tecnología nuclear dentro de lo relacionado con alimentación, salud, medio ambiente, energía, industria y seguridad radiológica.

Hablando de regulación, la ley de actividades nucleares de 1984 otorga la responsabilidad al gobierno mexicano, a través de la Secretaría de Energía, del uso y desarrollo de tecnologías nucleares acordes a la política energética del país. [13]

La CNSNS actúa como regulador responsable de la correcta aplicación de normas sobre seguridad nuclear, radiológica y de protección física de las instalaciones nucleares. De igual manera está a cargo de supervisar y aprobar los criterios para diseño, construcción, operación y desmantelamiento de instalaciones nucleares.

México es parte del tratado de no proliferación nuclear y de la convención sobre proliferación física de los materiales nucleares, junto con el tratado para la prohibición de armas nucleares en América Latina. Además, la constitución de los Estados Unidos Mexicanos establece el uso de la energía nuclear solo con fines pacíficos, respaldando a la ley de actividades nucleares.

La central nuclear de Laguna Verde (Figura 12) es la única central de generación eléctrica mediante tecnología nuclear de México. Localizada en el municipio de Alto Lucero, en el estado de Veracruz. Geográficamente, el sitio se rodea por el Golfo de México y por la carretera federal 180, mientras que al norte se encuentra Laguna Verde y al sur Laguna Salada. Cuenta con una capacidad instalada de 1,640 [MW] distribuidos en dos unidades de 820 [MW] cada una, con reactores nucleares BWR proporcionados por General Electric y contenciones tipo Mark II.

Siendo propiedad de la Comisión Federal de Electricidad, la central está certificada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, mientras que la Secretaría de Energía otorgó licencias de operación comercial a la unidad 1 en 1990 y a la unidad 2 en 1995. De igual manera cuenta con la supervisión de organismos internacionales que integran un apoyo para el cumplimiento de regulaciones para una operación óptima y segura. [13]

En 2007 se llevaron a cabo modificaciones para la modernización de la central, a cargo de Iberdrola y Alstom, que tuvieron en cuenta la modernización de la turbina, condensador, el reemplazo del generador eléctrico, el recalentador principal de vapor y el calentador de agua.



Figura 12. Vista aérea de la CNLV.

Fuente: <https://energyandcommerce.com.mx/central-nuclear-laguna-verde-aporta-18-de-energia-limpia-de-mexico/>

Dichas modificaciones lograron un incremento progresivo de aproximadamente 138 [MWe] desde 2008 y en 2011 se anunció que la capacidad de operación de las dos unidades de la central se elevó a 820 [MWe] y para julio de 2020, la Secretaría de Energía aprobó una licencia de operación que se extiende por 30 años, aumentando la operación de la unidad 1 hasta Julio de 2050. [14]

2.3 Plan de expansión de la energía nuclear en México

Dentro de un panorama donde México cuenta con experiencia en energía nuclear gracias a la participación de la CNLV en la matriz de generación eléctrica del país, considerar un plan de expansión de la energía nuclear se torna importante para la transición energética del país y la construcción de SEN sostenible.

En la Figura 13 podemos observar los diferentes valores reportados en los últimos cuatro documentos del PRODESEN. Dentro del PRODESEN 2020-2034 se comienza una proyección de una capacidad instalada de 1,500[MW] en energía nuclear en el periodo de 2025-2031. Mientras que en el PRODESEN 2022-2036, tenemos registrada la mayor capacidad instalada proyectada de energía nuclear de 2022 a 2036 en proyectos estratégicos pues se reporta una capacidad instalada de 2,500 [MW].

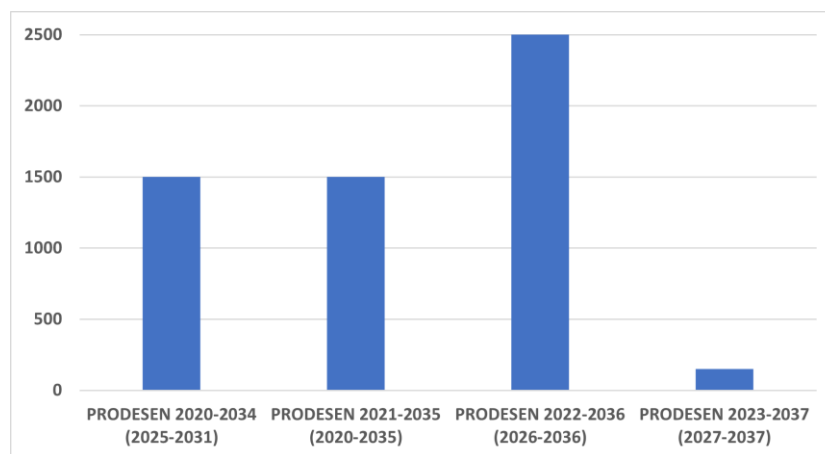


Figura 13. Capacidad instalada proyectada de energía nuclear en PRODESEN.

Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PRODESEN 2023-2037”

Sin embargo, en el PRODESEN 2023-2037 se publicó una capacidad instalada mínima, en comparación con versiones anteriores, de aproximadamente 150 [MW], desapareciendo prácticamente de los proyectos estratégicos en cuestión de capacidad instalada, como se puede observar en la Figura 14.

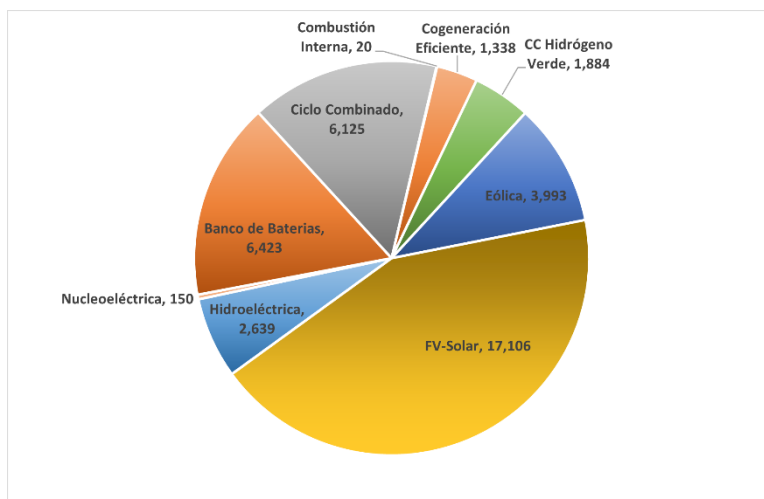


Figura 14. Adiciones de capacidad instalada PRODESEN 2023-2037.
Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PRODESEN 2023-2037”

En el PAMRNT se presentan tres escenarios de pronóstico de demanda y consumo, analizando diferentes variaciones en el consumo de combustibles fósiles y leña con la finalidad de realizar una electrificación en el sector residencial, comercial y el transporte; mediante la implementación de cambios significativos a partir del 2035 tomando en cuenta la generación distribuida fotovoltaica (GD-FV), electromovilidad (EM) y cambios tecnológicos de cargas térmicas de combustibles derivados de hidrocarburos, leña y termo-solar (CHLS).

Resalta la importante cantidad de capacidad instalada de la energía nuclear para generación eléctrica pues, como se ve en la Tabla 4, las tres versiones del PAMRNT presentan un rango de 10,000-12,009 [MW] de capacidad instalada en los tres escenarios de cada versión, siendo considerablemente mayor a la actual, lo que se traduce en una mayor participación en la generación eléctrica del país y en los objetivos de disminución de emisiones del sector eléctrico.

Analizando la capacidad instalada proyectada en los tres documentos de PAMRNT, como se muestra en la Figura 15, los tres escenarios muestran un decremento en la capacidad instalada para la energía nuclear a lo largo de las tres versiones del PAMRNT, sin embargo, la cantidad de capacidad instalada para la energía nuclear sigue siendo importante dentro de la matriz energética del país.

Tabla 4. Escenarios de capacidad instalada de energía nuclear.

Escenarios de Capacidad Instalada de Energía Nuclear 2050			
Documento PAMRNT	Capacidad instalada en [MW]		
	EC1	EC2	EC3
PAMRNT 2020-2034	12,009	12,009	12,259
PAMRNT 2021-2035	11,509	11,509	11,509
PAMRNT 2022-2036	10,068.702	9,968.946	9,949.788

Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PRODESEN 2020-2034, 2021-2035, 2022-2036”

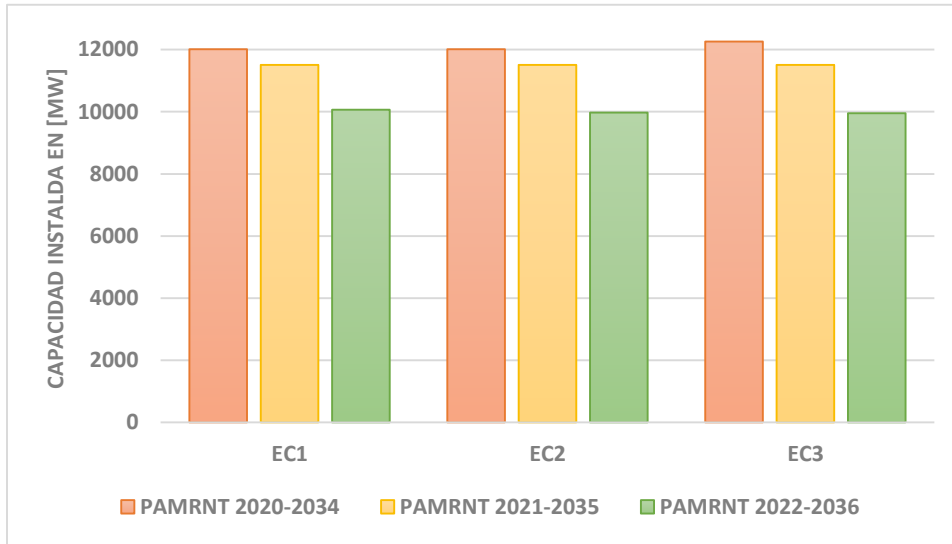


Figura 15. Capacidad instalada energía nuclear en los diferentes PAMRNT por escenario a 2050
Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PAMRNT 2020-2034, 2021-2035, 2022-2036”

En cuanto al índice de diversificación que se muestra en la Figura 16, en los tres escenarios de las diferentes versiones del PAMRNT se observa que sobrepasa un índice de 2, siendo mayores en el tercer escenario de cada versión, apelando a un escenario más ambicioso en cuestión de energías limpias y renovables.

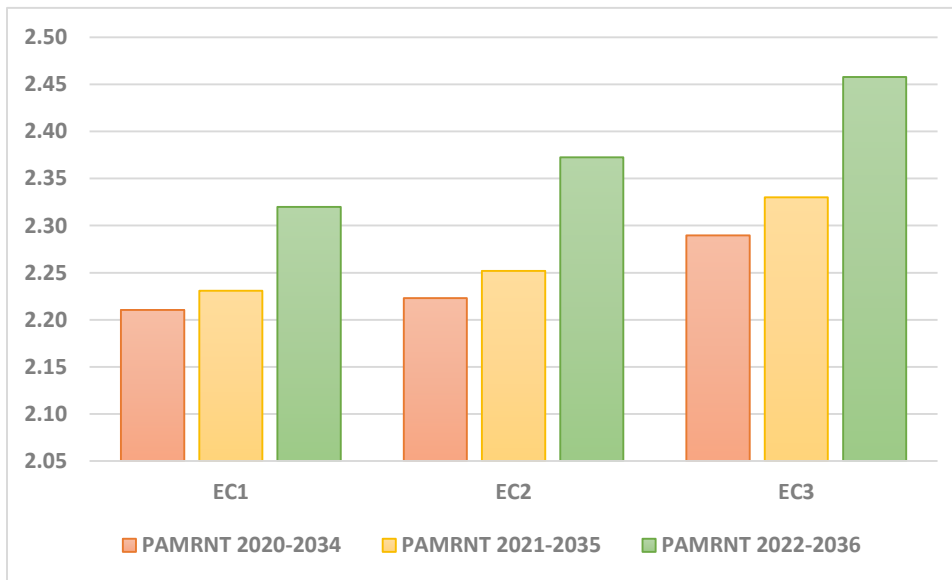


Figura 16. Índice de diversificación de la capacidad instalada por escenarios del PAMRNT a 2050.
Fuente: Secretaría de Energía (SENER), PAMRNT 2020-2034, 2021-2035, 2022-2036”

Gracias al aumento de la capacidad instalada en energía nuclear y energía eólica, el SEN presenta una diversificación superior a dos, generando un plan de bajo riesgo en el cual no existe dependencia en una sola tecnología y disminuyendo el riesgo cuando un tipo de combustible se vea comprometido.

En cuanto al PAMRNT 2023-2037 se dejan de estudiar los escenarios antes presentados, además en las proyecciones realizadas en cuestión de capacidad instalada (Figura 14) es preocupante la nula participación de la energía nuclear en las futuras incorporaciones de centrales de generación.

Es necesario considerar cómo la capacidad instalada y la generación eléctrica por medio de energía nuclear puede brindar ayuda a la matriz de generación del país, pues es capaz de lograr una mayor diversificación otorgando mayor seguridad energética y solidez al SEN, la flexibilidad propia de la energía nuclear es capaz de proporcionar el respaldo al aumento en la generación por medio de energías renovables, de la mano con una disminución en las emisiones contaminantes y así contribuir con el cambio climático.

Capítulo 3. Reactores modulares pequeños

La evolución tecnológica nuclear muestra que en el mundo se han desarrollado cuatro generaciones de reactores nucleares, en la Figura 17 se muestran los periodos a los que se refiere cada generación, la primera generación abarca los reactores desarrollados antes del año de 1965, el periodo comprendido entre 1965 y 1995 abarca la segunda generación, para el periodo de 1995 a 2010 se comprende la generación III, con los avances y mejoras realizadas a los reactores de tercera generación se experimentó un cambio generacional dando origen a la generación III+ la cual se estima que durará hasta el año 2030 para dar paso a la cuarta generación.

3.1 Generaciones de reactores nucleares

La **generación I** se trata básicamente de los primeros reactores de potencia, son prototipos fabricados entre las décadas de 1950 y 1960. Al ser reactores prototipo, operaban a niveles de potencia de “prueba concepto”. En Estados Unidos eran regulados por la NRC bajo la normativa del Título 10, Código de Regulaciones Federales, parte 50 (10 CFR Parte 50). Es la generación que estableció las bases para las siguientes generaciones de reactores nucleares. [15]

La **generación II** fue la evolución de la generación anterior, fueron diseñados para generación eléctrica. Eran económicamente viables, con mejores sistemas de seguridad, vida útil de 40 años y mayor potencia que la generación anterior.

Dentro de los principales reactores se encuentran los reactores de agua a presión (PWR), reactores CANDU, reactores de agua en ebullición (BWR) y reactores avanzados refrigerados por gas. Actualmente, la mayoría de las centrales nucleares del mundo utilizan reactores de segunda generación.

La **generación III** presenta ventajas respecto a la generación II, incluyendo la portabilidad, la seguridad y la confiabilidad son aún mayores que las generaciones anteriores, el tiempo de vida aumenta a 60 años con la posibilidad de poder aumentarlo con actualizaciones y correctos mantenimientos.

Los cambios más relevantes en la **generación III+** son en torno a la seguridad pasiva, aumentando la seguridad propia del reactor y disminuyendo la intervención del operador en los sistemas de seguridad. Canadá es un ejemplo pues cuenta con centrales de generación III+ en Quebec, Ontario y New Brunswick.

Los sistemas de seguridad son probados continuamente por los operadores, con la flexibilidad de intervenir o no, y de igual manera, son sistemas que no requieren energía externa para su funcionamiento.

En la **generación IV** los reactores muestran tecnología que sigue en el proceso de investigación. Los principales objetivos son reducir los costos, aumentar la vida del reactor y mejorar la seguridad. De igual manera se tiene el reactor de sales fundidas, el reactor rápido enfriado por sodio, reactor enfriado por agua supercrítica y el reactor de gas de muy alta temperatura.



Figura 17. Generaciones de reactores nucleares.

Fuente: Foro nuclear, <https://www.foronuclear.org/recursos/infografias/generaciones-de->

3.2 Small modular reactors

Los SMRs (Small Modular Reactors) son reactores nucleares principalmente de generación III+ con una potencia de generación de hasta 300 [MWe], donde la característica principal es la capacidad de ser construidos en fábrica para ser transportados en módulos al sitio de instalación. Al igual que los grandes reactores comerciales, se están desarrollando reactores modulares de diferentes tipos de tecnologías, desde reactores convencionales BWR y PWR hasta reactores refrigerados por gas, por metales líquidos y reactores de sales fundidas.

El concepto de reactores modulares hace referencia a la capacidad de diseñar y ensamblar un reactor a partir de diferentes módulos pequeños, haciendo posible la construcción de diferentes unidades de manera paralela. Teniendo como ventajas la estandarización de componentes, la posible construcción en fábrica y la simplificación de la instalación in situ. Además de la reducción de costos de inversión, construcción, operación, mantenimiento y la reducción de los tiempos de construcción asociadas al diseño modular y la construcción en fábricas.

Al igual que los demás reactores nucleares ofrecen la flexibilidad de usarse para aplicaciones diferentes a la generación eléctrica, desde el suministro de calor para calefacción, calor de proceso, desalinización de agua de mar y producción de hidrógeno, para así aumentar la eficiencia asociada mediante cogeneración. Gracias a los menores requerimientos de espacio, pueden ser instalados

en zonas rurales donde el acceso a la red eléctrica principal sea limitado y en sistemas aislados de la red eléctrica principal.

Los SMRs basan su seguridad en sistemas pasivos y diversas características de seguridad inherente del reactor, de esta manera la intervención del operador, de fuentes externas de alimentación (generadores eléctricos) no es necesaria para detener los sistemas. Los sistemas pasivos dependen plenamente de fenómenos físicos como lo es la circulación natural y la gravedad, aumentando la seguridad del reactor en caso de un accidente.

Se cuenta con la participación de diferentes instituciones con la finalidad de impulsar las tecnologías de los SMRs, actualmente se tienen más de 80 diseños de SMR en el mundo (ver Figura 18), ya sea en fase de construcción, diseño o licenciamiento.

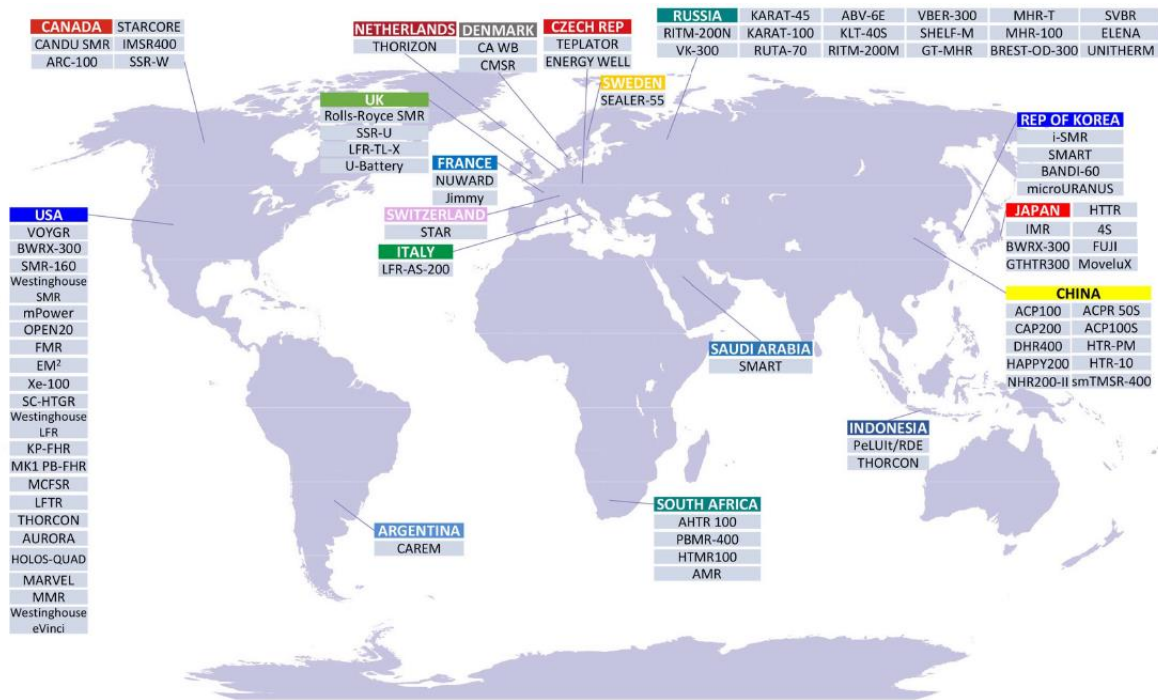


Figura 18. Desarrollo e implementación de SMRs en el mundo

Fuente: IAEA Advanced Reactors Information System, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments", (2022).

En 2020 entró en operación la primera central nuclear que utiliza un reactor SMR la central Akademik Lomonosov de Rusia, cuenta con dos unidades de generación flotantes con una capacidad de 35 [MWe] [16]. De igual manera se encontraban en etapa de construcción dos reactores, el CAREM, un prototipo de un modelo comercial con mayor capacidad en Argentina y el HTR-PM en China, un modelo de demostración de una central de generación. El HTR-PM es un reactor refrigerado por gas de alta temperatura, es un reactor de demostración de generación eléctrica con una capacidad de 210 [MWe]. Las primeras pruebas funcionales se completaron en 2020 y en diciembre de 2021 el reactor 1 se conectó a la red eléctrica para comenzar la producción de energía. [16]

Múltiples SMR están contemplados para ser construidos y conectados a la red en la presente década (ver Figura 19), con modelos que cuentan con licenciamiento como lo son el proyecto VOYGR de NuScale y el BWRX-300.

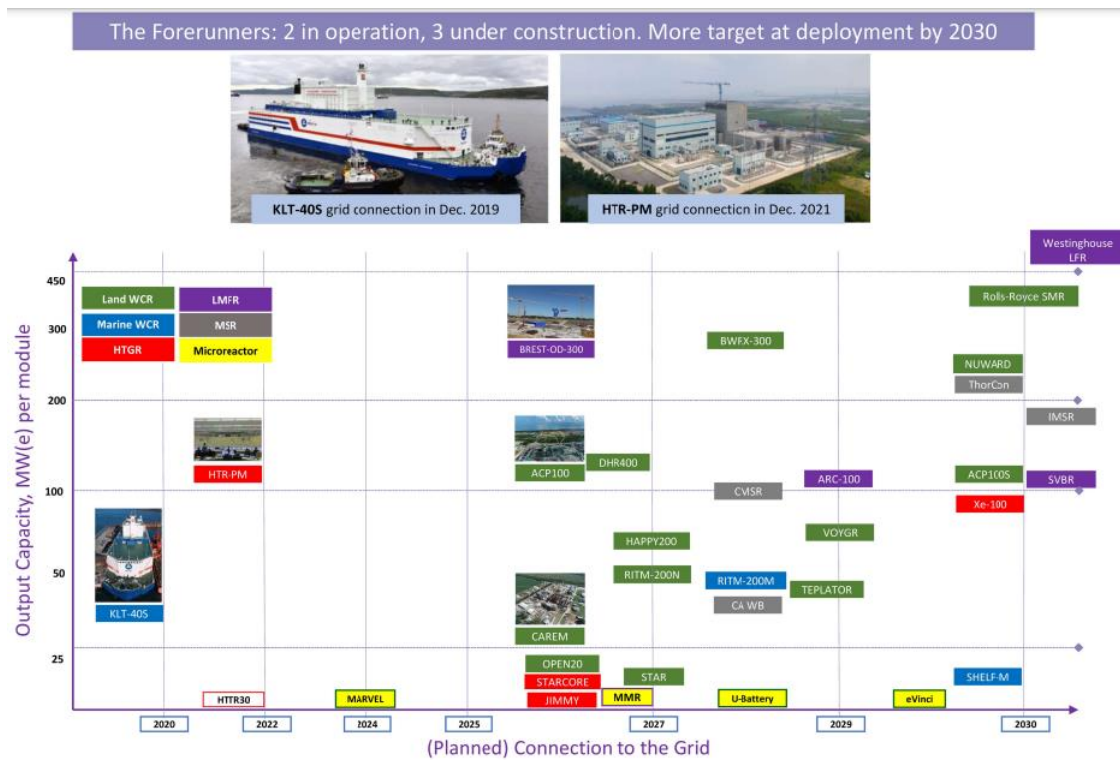


Figura 19. Cronograma de implementación desde el año 2020.

Fuente: IAEA Advanced Reactors Information System, “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments”, (2022).

3.3 Reactor nuclear BWRX-300

El reactor nuclear BWRX-300 se presenta como una variante de los reactores nucleares de agua en ebullición (BWR) fabricado por GE Hitachi Nuclear Energy, siendo un reactor modular pequeño de circulación natural y refrigerado por agua. Se considera la evolución del reactor nuclear económico simplificado de agua en ebullición (ESBWR), el cual cuenta con el licenciamiento de la comisión reguladora nuclear de Estados Unidos. Al ser la evolución del reactor certificado ESBWR, tiene la facilidad de utilizar materiales, componentes y equipos aprobados previamente.

En Estados Unidos es desarrollado por GE-Hitachi Nuclear Energy mientras que en Japón se desarrolla por Hitachi GE Nuclear Energy. Se considera que el diseño del BWRX-300 puede implementarse a corto plazo, teniendo como objetivo su implementación en 2029. En la Figura 20 se muestra una imagen previa de cómo podría lucir una futura central de un reactor BWRX-300.

Destaca entre sus principales características el uso de circulación natural y sistemas de condensado de aislamiento de enfriamiento pasivo utilizados en el ESBWR y los cuales cuentan con el licenciamiento de la NRC. La gravedad, junto con la condensación de vapor, permite un enfriamiento pasivo del reactor durante siete días sin energía ni acción alguna del operador. [17]

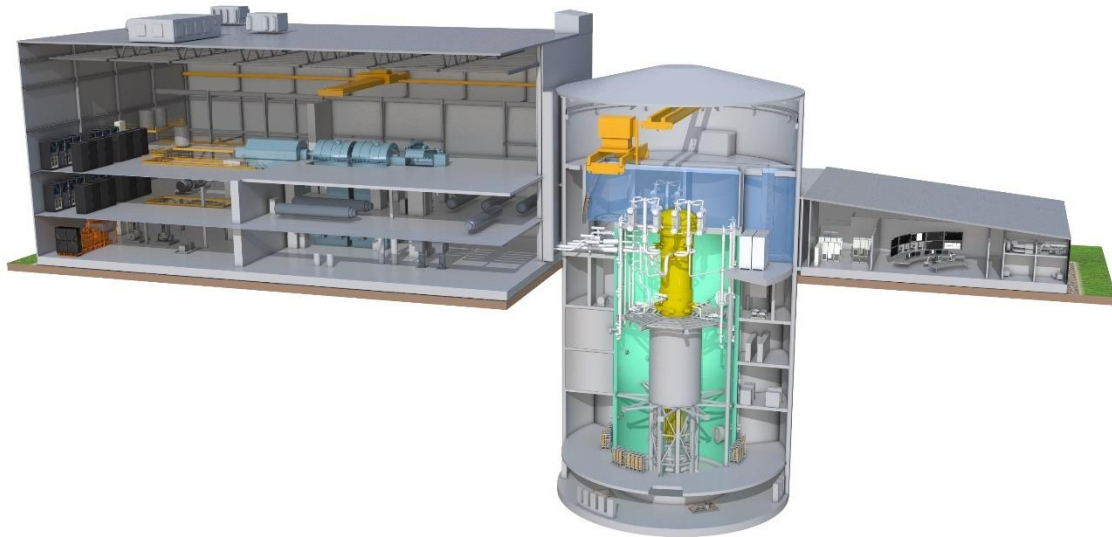


Figura 20. Proyección de una central de generación BWRX-300.
 Fuente: Sitio de internet GE-Hitachi, <https://nuclear.gpower.com/bwrx-300>

Además de ser refrigerado y moderado por agua, mientras que utiliza uranio enriquecido como combustible, presenta un ciclo de reabastecimiento de 12-24 meses y un diseño de matriz de combustible de 10x10 elementos. Destacando una vida de operación de 60 años y resaltando ser un reactor seguro debido a los sistemas pasivos de seguridad. [17]

La vasija del reactor en un BWRX-300, Figura 21, se diseña como un cilindro vertical dentro del cual se encuentran el núcleo del reactor y las barras de combustible, siendo los mismos elementos combustibles que se usan en los BWR en la actualidad y consiste en un diseño de matriz de 10x10 barras de combustible.

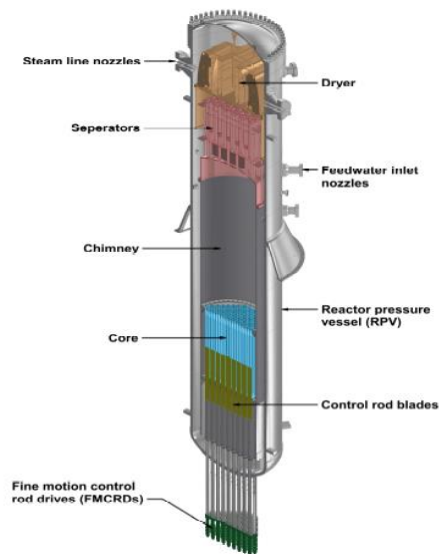


Figura 21. Vasija del Reactor BWRX-300.
 Fuente: GE Hitachi, BWRX-300 General Description, Revision E, August 2023.

Las barras de control de movimiento fino se introducen mediante un motor de desplazamiento fino para controlar la reactividad del núcleo del reactor durante la operación normal y un mecanismo hidráulico de inserción en caso de una parada de emergencia.

El sistema de refrigeración opera mediante circulación natural, esto quiere decir que no requiere de bombas principales de recirculación como en modelos anteriores BWR, aumentando la seguridad del reactor en caso de un apagón en la central de generación, pues no utiliza elementos externos que requieran energía eléctrica para su funcionamiento.

El sitio para la instalación del BWRX-300 comprende un espacio de 140 [m] por 70 [m] (ver Figura 22), el cual contiene los principales edificios como el edificio del reactor, el edificio de turbinas, el centro de control, torres de enfriamiento, estacionamiento y el edificio de combustible gastado. Destacando que el edificio del reactor es el único con categoría sísmica 1, además, la contención primaria, así como el reactor se encuentran diseñados para ubicarse bajo tierra, por debajo del nivel del suelo de la central.

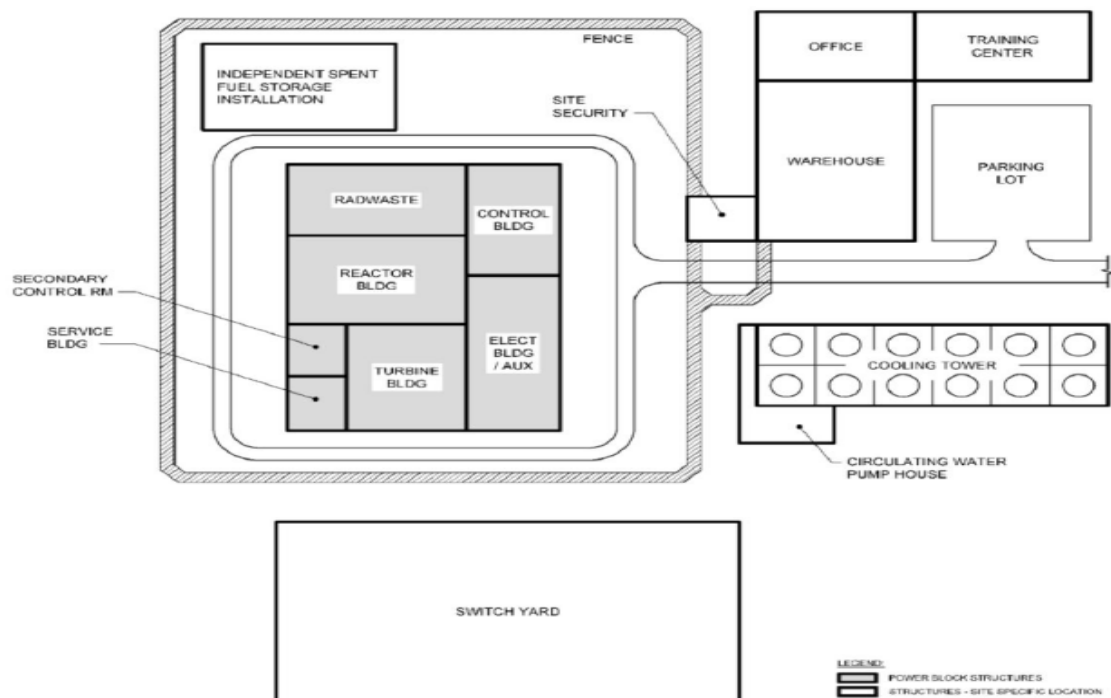


Figura 22. Diagrama de planta de una central BWRX-300.

Fuente: Status Report-BWRX-300, https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300_2020.pdf (2019)

A diciembre de 2023 el reactor BWRX-300 cuenta con revisiones de la oficina de regulación nuclear del Reino Unido, de la comisión reguladora nuclear de Estados Unidos y la Comisión de Seguridad Nuclear de Canadá. El BWRX-300 ha sido evaluado como tecnología madura en Reino Unido, mientras que en Estados Unidos se han aprobado cinco informes de licenciamiento para características relacionadas con el diseño y métodos considerados con mayor riesgo de regulación. [16]

En 2021 GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) fue seleccionado por Ontario Power Generation (OPG) como colaborador para el proyecto nuclear de Darlington, el objetivo es implementar un reactor modular pequeño BWRX-300 con un plan para completarse en 2028. [18]

De igual manera se anunció una colaboración entre GE Hitachi Nuclear Energy, BWXT Canada Ltd y Synthos Green Energy para colaborar en un futuro despliegue de reactores BWRX-300, se planean desplegar 10 unidades de reactores BWRX-300 en Polonia a principios de 2030. [18]

En agosto de 2022, Tennessee Valley Authority llevó a cabo una planificación para otorgar licencias preliminares para el despliegue de un reactor BWRX-300 en el sitio de Clinch River, así mismo, en junio de 2022 SaskPower seleccionó el reactor BWRX-300 para una posible aplicación en Saskatchewan. [18]

En 2023 se firmó un contrato entre las empresas GE Hitachi Nuclear Energy, Ontario Power Generation, SNC-Lavalin y Aecon con la finalidad de instalar un reactor BWRX-300 en el proyecto nuclear de Darlington, siendo el primer contrato comercial relacionado con un SMR en América del Norte. La empresa llamada Fermi Energía seleccionó el reactor nuclear BWRX-300 para un posible despliegue en Estonia a principios de 2030, Fermi Energía y GEH trabajan desde 2019 y han colaborado en áreas clave para el soporte de licencias y el desarrollo de la cadena de suministro. [19]

El objetivo a largo plazo de los trabajos en conjunto de GE Hitachi es que el diseño obtenga las licencias pertinentes para su despliegue en Canadá, Estados Unidos y Polonia, siendo planeados los primeros reactores a principios de la década de 2030. El BWRX-300 se plantea como un reactor simplificado que puede aprovechar componentes probados bajo un diseño basado en un reactor con licenciamiento, siendo un SMR con menor riesgo, rentable y con una comercialización más rápida.

3.4 Reactor nuclear VOYGR

La compañía estadounidense NuScale Power trabaja en el desarrollo de una central de generación de energía eléctrica basado en un reactor de agua ligera cuyo objetivo es suministrar electricidad con diferentes aplicaciones como calefacción urbana y desalinización de agua de mar, entre otras.

El “NuScale Power Module” se presenta como un diseño de reactor modular pequeño capaz de generar una potencia eléctrica de 77 [MW], basándose en ser un reactor integrado con tecnología de funcionamiento de los reactores de agua a presión (PWR; Pressurized Water Reactor) y siendo el primer reactor en recibir la aprobación de diseño de la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos. [20]

Se basa fundamentalmente en tecnología probada de reactores PWR con las características evolutivas en cuestión de seguridad de las últimas generaciones de reactores, la implementación de fenómenos naturales en el funcionamiento como flujo de circulación natural, permite un funcionamiento en el cual no se tienen componentes activos que requieran de suministro eléctrico para su funcionamiento.

Se presentan tres diferentes configuraciones del diseño de planta de VOYGR SMR, la planta VOYGR-12 cuenta con una capacidad de generación eléctrica de 924 [MW], por su parte, la configuración VOYGR-6 cuenta con una capacidad de generación de 462 [MWe] y la configuración VOYGR-4

registra una capacidad de generación de 308 [MWe], destacando un factor de capacidad superior al 95% en las tres configuraciones. [20]

Gracias a la reducción de componentes, tamaño y la simplicidad de operación, los módulos NuScale Power Modules se producirán completamente en fábrica y transportándose para su instalación en el edificio del reactor en forma incremental. Estas características son ventajas en la reducción del tiempo de construcción y el costo total pues después de la instalación del primer módulo, los siguientes módulos se pueden seguir instalando mientras se operan los anteriores, obteniendo la capacidad de generar electricidad mientras la central sigue en construcción.

En la Figura 23 se muestra el diseño de sitio de planta para la versión VOYGR-12, la cual consta del edificio del reactor en el centro del sitio, dos edificios de turbinas los cuales cuentan con seis turbinas y generadores, la sala de control y el edificio de manejo de desechos radiactivos. En total se consideran 140,000 [m²] para el sitio de la central de generación VOYGR-12. [21]

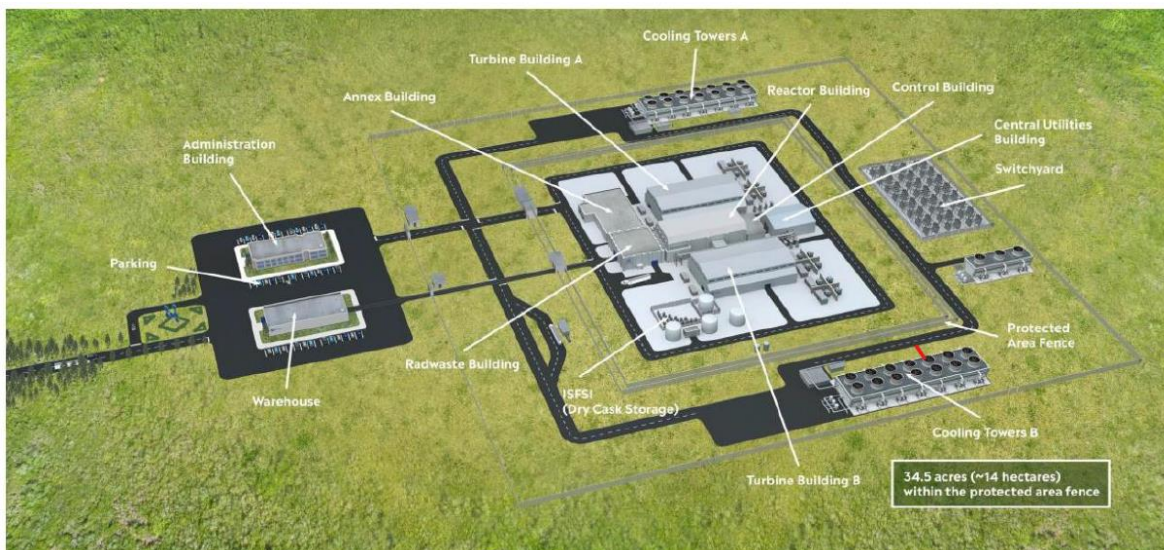


Figura 23. Layout de una central de generación VOYGR-12.

Fuente: "Status Report-NuScale SMR", https://aris.iaea.org/PDF/NuScale-NPM200_2020.pdf, (2020)

La configuración del reactor de un módulo NuScale Power Module se muestra en la Figura 24. Se trata de un diseño integrado que contiene el núcleo, dos generadores de vapor de bobina helicoidal y un presurizador dentro del reactor, dentro de un recipiente contención de acero. El núcleo del reactor cuenta con una matriz de 37 conjuntos de combustible y 16 conjuntos de barras de control, donde los conjuntos de combustible consisten en una configuración aprobada de PWR de 17x17, mientras que los presurizadores y rociadores se ubican en la parte superior del recipiente para suministrar el control de presión. Cada uno de los módulos operan y se instalan por debajo del nivel del suelo, cubiertos por una piscina de agua con capacidad de 28,000 [m³] y revestimiento de acero. [21]

El recipiente de contención de los módulos de NuScale se diseñó como un recipiente cilíndrico que alberga al reactor, tuberías y componentes del sistema de generación de vapor. Está diseñado con una altura de 23 [m], un diámetro exterior de 4.5 [m] que opera a una temperatura de 37 [°C] y

proporciona enfriamiento pasivo, la presión de diseño es de 8.3 [MPa] y la temperatura de diseño es de 316 [°C]. [21]

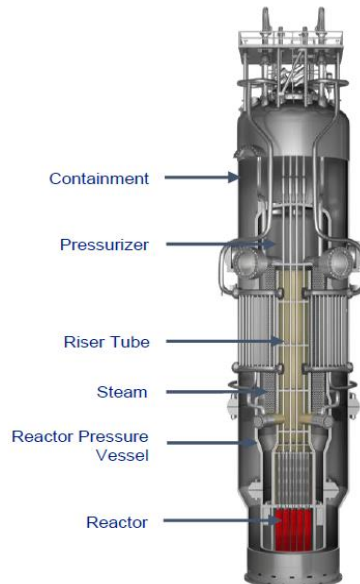


Figura 24. Vasija del reactor NuScale Power Module.

Fuente: "Status Report-NuScale SMR", https://aris.iaea.org/PDF/NuScale-NPM200_2020.pdf (2020)

Los módulos se encuentran sumergidos bajo un escudo biológico en una bahía abierta como se muestra en la Figura 25, donde se incluye el equipo de montaje/desmontaje de los módulos, utilizado para la instalación de nuevos módulos y para el reabastecimiento de combustible.

El diseño del edificio del reactor otorga la facilidad de efectuar el reabastecimiento de combustible en un solo módulo mientras los módulos restantes continúan operaciones normales. El reabastecimiento de combustible de manera escalonada puede ser realizado durante todo el año o agruparse durante periodos de baja demanda.

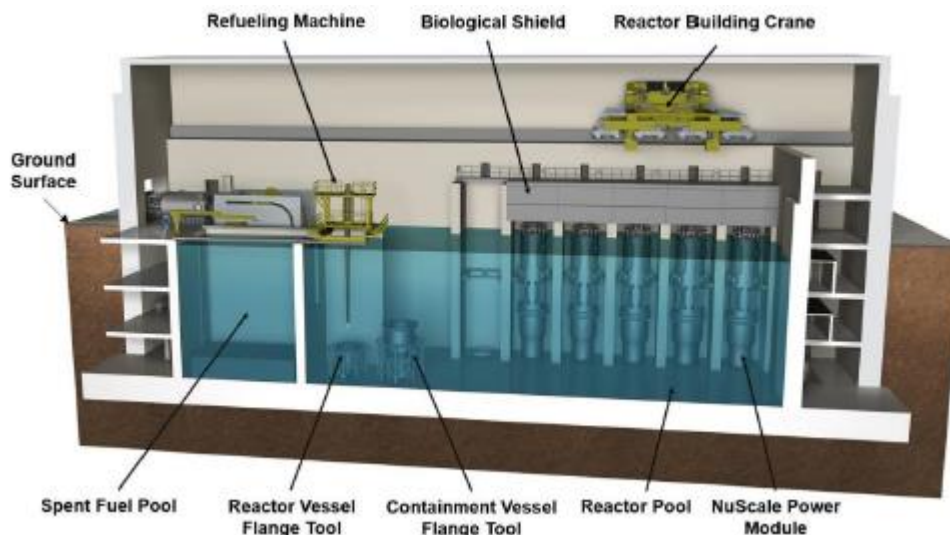


Figura 25. Vista de corte lateral de una central de generación VOYGR-12

Fuente: "Status Report-NuScale SMR", https://aris.iaea.org/PDF/NuScale-NPM200_2020.pdf (2020)

Se proyectan tiempos de reabastecimiento de 10 días, durante el proceso de recarga de combustible un tercio de los elementos combustibles se extraen del núcleo mientras el resto se reacomoda en una posición central comenzando de afuera hacia dentro.

Los elementos retirados se almacenan en la piscina de combustible usado para un primer enfriamiento y posteriormente se trasladan a un almacenamiento en seco. Después de la recarga de combustible, el módulo se vuelve a montar en su posición y se reconecta a las líneas.

Gracias al conjunto de turbina-generador diseñado por cada módulo permite el apagado temporal de un solo módulo sin la necesidad de apagar toda la planta. Además, la flexibilidad para configurar la planta permite al propietario optimizar la producción de electricidad mediante cogeneración.

Los sistemas de instrumentación y control de NuScale están basados en cuatro principios de diseño: independencia, redundancia, previsibilidad y repetibilidad, diversidad y defensa en profundidad. El sistema de control es totalmente digital, las demandas de los operadores del reactor en la sala de control se reducen debido a los requisitos operativos reducidos en comparación con los reactores grandes tradicionales.

Se está trabajando en una licencia combinada (combined license application, COLA) la cual será presentada a la comisión reguladora nuclear (NRC) de Estados Unidos a principios de 2024 con una futura aprobación en 2026.

En Europa se plantean proyectos de reutilización de sitios de centrales de generación de carbón en Rumania con RoPower para 2030. En Polonia se trabaja con la empresa KGHM en la reutilización de centrales de carbón y de igual manera se busca sitios potenciales de proyecto para un futuro despliegue en 2029. [21]

En Corea del Sur se trabaja con GS Energy Corporation para construir una central SMR en Uljin, donde se planea comenzar en 2028 la construcción y la entrada en operación en 2030 con la finalidad de operar un complejo industrial de hidrógeno en Uljin. De igual manera se trabaja con Kazakhstan Nuclear Power Plants (KNPP) en una evaluación para el despliegue de centrales de generación nuclear analizando la viabilidad de los módulos de NuScale. [21]

NuScale presentó una solicitud de certificación de diseño en enero de 2017 completando la fase 1 de la revisión de certificación de diseño en abril de 2018. En 2020 la NRC aprobó el diseño estándar de NuScale convirtiendo al modelo NuScale Power Module en el primer SMR en obtener la aprobación de diseño. [21]

3.5 Reactor nuclear SMART

En el año de 1996 el Instituto de Investigación de Energía Atómica de Corea (KAERI) comenzó el proyecto del Reactor Avanzado Modular Integrado al Sistema (SMART), se presenta como un reactor PWR integral con una potencia eléctrica de 100 [MWe], 330 [MWt] y hasta 40,000 toneladas de agua desalinizada basando su diseño en características cuya finalidad es mejorar la seguridad, confiabilidad y la economía. [22]

Es un reactor multipropósito para generación de energía eléctrica, calefacción urbana, producción de hidrógeno, desalinización de agua de mar y calor de proceso, con la capacidad de adaptarse a redes aisladas. Todas las tecnologías, componentes y características de diseño que se implementan

en el reactor SMART han sido probadas en la industria y calificadas a través del propio sistema de verificación de diseño de SMART.

El objetivo del diseño del reactor SMART es una mejora económica debido a la simplificación del sistema, componentes modulares, tiempos de construcción menores y una alta disponibilidad de planta. En cuanto a la seguridad, se ha logrado mejorar gracias a las características inherentes y sistemas pasivos de seguridad.

En el reactor SMART se implementó un diseño integral en el cual la vasija del reactor contiene todos los componentes primarios que el reactor necesita (ver Figura 26). De esta manera las conexiones de gran tamaño, hablando de tuberías, quedan excluidas aumentando la seguridad del reactor eliminando posibles fallas por rotura en tuberías refrigerantes. Dentro de la vasija los generadores de vapor constan de tubos enrollados helicoidalmente, junto con un inventario de agua, cuatro bombas de refrigerante del reactor y el presurizador.[23]

Implementa sistemas de seguridad pasivos en donde la circulación natural de refrigerante actúa como sistema de emergencia para eliminar calor. El control de la reactividad en funcionamiento se lleva a cabo por medio de barras de control y boro soluble, mientras que la bomba de refrigerante del reactor cuenta un motor encapsulado sin sellos de bomba, mejorando la seguridad evitando la pérdida de refrigerante por falla en los sellos de bomba.

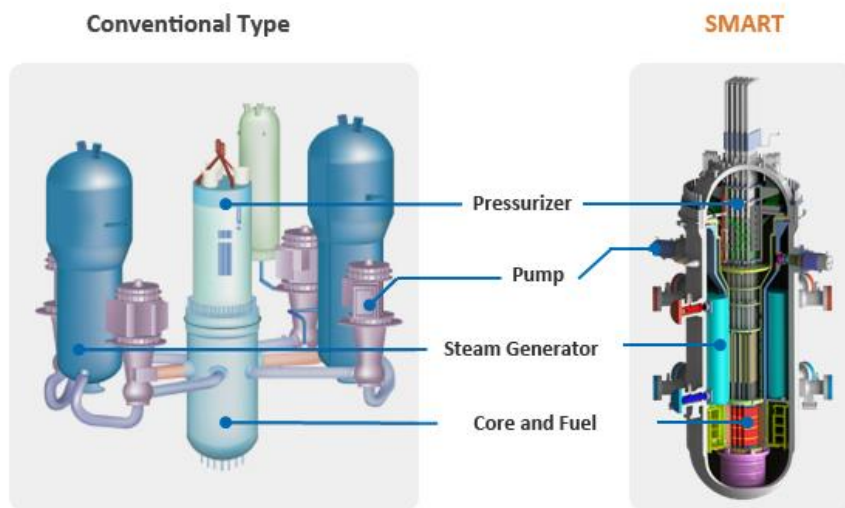


Figura 26. Vasija del reactor SMART.

Fuente: Sitio de internet de KAERI, <https://www.kaeri.re.kr/eng/>

La configuración del combustible consta de una matriz de 17x17 elementos combustibles diseñada para lograr la máxima duración entre recargas de combustibles, donde se plantean ciclos de reabastecimiento de combustible de 36 meses minimizando los análisis de recarga de combustible.

En cuanto al diseño de la central (Figura 27), se ha diseñado para albergar una estructura de toma de agua de mar y edificios principales. La sección de generación de energía cuenta con edificios auxiliares y de contención del reactor, también alberga los edificios de generadores y una sección

compartida por dos unidades de generación SMART. El área de contención del reactor consta de un área de contención inferior y un área de contención superior, también se encuentran los tanques de reposición del núcleo y los tanques de inyección de seguridad. [22]



Figura 27. Layout de una central de generación SMART.

Fuente: IAEA Advanced Reactors Information System, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments", (2022).

Capítulo 4. Metodología KIND-ET

Se lanzó en el año 2000 el Proyecto Internacional sobre Ciclos de Combustible y Reactores Nucleares Innovadores (International Project in Innovative Nuclear Reactor and Fuel Cycles, INPRO) dirigido por el OIEA, donde las primeras actividades fueron orientadas al desarrollo de una metodología capaz de evaluar la sostenibilidad de un sistema de energía nuclear (NES). Así surgió el proyecto de colaboración sobre Indicadores Clave para Sistemas Innovadores de Energía Nuclear (Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems, KIND) bajo la supervisión del OIEA y como parte del proyecto INPRO.

El proyecto KIND se creó con la finalidad de desarrollar herramientas capaces de llevar a cabo una evaluación del estado actual, las perspectivas a futuro, los riesgos asociados y los beneficios en el desarrollo de nuevas tecnologías nucleares y siendo aplicable a sistemas no nucleares.

KIND-ET es una herramienta basada en la teoría de valor de múltiples atributos (MAVT) que gracias a su interfaz, fácil de usar, el usuario puede realizar modificaciones que permitan aplicar sus preferencias, pudiendo identificar ventajas y desventajas, evaluar diversas situaciones y el rendimiento de diferentes tecnologías nucleares.

Se distinguen tres objetivos importantes en la metodología KIND. El primer objetivo es desarrollar una base teórica con fundamentos matemáticos que permitan realizar una evaluación comparativa de las opciones de sistemas de energía nuclear. Debido a que la naturaleza propia de los Sistemas de Energía Nuclear (NES) aborda diferentes áreas de estudio que van de los aspectos económicos, no proliferación, opinión pública, aspectos técnicos de rendimiento del reactor y generación de desechos; se genera la necesidad de la implementación de los métodos de análisis de decisiones multicriterio (MCDA). [24]

Dada la amplia gama de opciones comparativas, el siguiente objetivo de la metodología KIND es suministrar orientación acerca de las entradas necesarias para aplicar métodos de MCDA y tener una evaluación específica del NES.

Dentro de este objetivo surge el desarrollo del conjunto de indicadores que utilizan un sistema de valor-utilidad para expresar las preferencias de los datos de entrada. Además de un sistema de conjuntos de ponderaciones que agrupan los indicadores individuales en un indicador general para cada opción que se quiere evaluar. Es necesario un análisis de sensibilidad que sea capaz de determinar la incertidumbre en el resultado y la variación en el resultado debida a la incertidumbre.

Como último objetivo, se proporciona una herramienta de software, incluyendo una base matemática de MCDA, un conjunto de indicadores apropiados con la personalización de los valores de entrada para el análisis de toma de decisiones, junto con la información del uso de gráficos y tablas integradas para interpretar los resultados.

Los indicadores se pueden usar en una evaluación de diferentes aspectos a manera de comparación de un sistema de energía nuclear, centrándose en temas particulares como la seguridad, economía, recursos, resistencia a la proliferación, generación de desechos y sostenibilidad.

En general, se requiere establecer un grupo de indicadores de desempeño para así establecer un árbol de objetivos y preparar una tabla de desempeño, además de asignar funciones y unidades

para el análisis de los indicadores, siendo necesario para realizar un análisis de sensibilidad y así poder llevar a cabo recomendaciones finales al problema determinado.

4.1 Aplicación de MCDA en el marco KIND-ET

Las técnicas de toma de decisiones de criterios múltiples (Multicriteria Decision Making, MCDM) se utilizan como un conjunto de herramientas de apoyo en la toma de decisiones, siendo el análisis de decisiones multicriterio (Multicriteria Decision Analysis, MCDA) y la toma de decisiones multiobjetivo (Multiobjective Decision Making, MODM) las principales en los métodos MCDM.

La aplicación del MCDA apoya la toma de decisiones haciendo sencillo el proceso de encontrar un conjunto de opciones aceptables y poder clasificar las alternativas. El MCDA consiste en el análisis de un número finito de alternativas que se especifican en el inicio del proceso de aplicación, donde cada alternativa presenta su desempeño en múltiples criterios de análisis. Se puede definir si se quiere encontrar la mejor alternativa de un conjunto de opciones o encontrar un conjunto de alternativas aceptable. [25]

En la implementación de MODM las alternativas no se encuentran definidas y se puede encontrar una solución resolviendo un modelo matemático, resultando en un gran conjunto de alternativas. La principal diferencia con el MCDA es la definición explícita o implícita de las alternativas. [25]

En la tabla 5 se muestra la comparación entre MCDA y MODM, en la cual destaca el MCDA como un análisis propio para la metodología KIND-ET por los criterios definidos por atributos, la definición explícita de los atributos de evaluación, la definición finita y explícita de alternativas, la orientación a resultados y su relevancia en la evaluación y elección de alternativas.

Tabla 5. Comparación de los enfoques MODM y MCDA.

Criterios de comparación	MODM	MCDA
Criterios definidos por	Objetivos	Atributos
Objetivos definidos	Explícitamente	Implícitamente
Atributos definidos	Implícitamente	Explícitamente
Restricciones definidas	Explícitamente	Implícitamente
Alternativas definidas	Implícitamente	Explícitamente
Número de alternativas	Infinito (grande)	Finito (pequeño)
Control del decisor	Significativo	Limitado
Paradigma de modelado de decisiones	Orientado a procesos	Orientado a resultados
Relevante para	Diseño/búsqueda	Evaluación/Elección

Fuente: Kuznetsov, Vladimir. *Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Energy System/Scenario Options: KIND approach and KIND evaluation tool. NENP/INPRO.*

El proceso del MCDA inicia estableciendo al tomador o equipo tomador de decisiones, se establece el problema o la meta deseada, se indican las alternativas a evaluar y los criterios de evaluación, se realiza el análisis de incertidumbre y sensibilidad, por último, se realizan las recomendaciones que servirán de ayuda a los tomadores de decisiones.

La formulación del problema requiere establecer el tema que se requiere analizar, exponiendo la situación actual y el resultado deseado. Surge la necesidad de especificar los requisitos, condiciones y restricciones que aplican al análisis. Posteriormente la formulación de alternativas identifica las posibles opciones que cumplen con los requisitos, condiciones y restricciones establecidas. La identificación de los criterios de evaluación otorga parámetros cuantitativos y cualitativos relacionados con los objetivos, siendo necesaria la coincidencia de cada criterio con uno o más objetivos.

Multi-attribute Value Theory (MAVT) es una teoría basada en el análisis multicriterio, utilizando una función de utilidad de múltiples atributos con la finalidad de mostrar las ventajas de la toma de decisiones entre dos o más opciones.

Asume la agregación de juicios en temas de costos, riesgos y beneficios evaluados en un puntaje general que utiliza funciones de valor de múltiples atributos tomando en cuenta la opinión del grupo de expertos y la preferencia del tomador de decisiones. Las funciones de valor de atributo único se evalúan en cada indicador mediante la transformación de los valores naturales locales de cada indicador en una escala universal adimensional.

Los puntajes generales otorgan un rango en donde la alternativa preferida tendrá el puntaje general más alto. Es aplicable para casos en los que se tiene certeza de los resultados de cualquier elección y también en aquellos en condiciones de incertidumbre.

MAVT se utiliza como un método comparativo donde se aplican distintas medidas relacionadas a costos, riesgos, y beneficios de la mano con las preferencias de un grupo de expertos y el responsable de la toma de decisiones.

En general se requiere una descomposición en niveles de utilidad para todos los indicadores (factores de ponderación) con una escala de pesos y una evaluación con modelos de agregación [24]. La ecuación de valor multiatributo se presenta de la siguiente forma:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) + \sum_{\substack{i=1 \\ j>i}}^n k_i k_j u_i(x_i) u_j(x_j) + \sum_{\substack{i=1 \\ j>i \\ l>j}}^n k_i k_j k_l u_i(x_i) u_j(x_j) u_l(x_l) + \dots$$

$$+ k^{n-1} k_1 k_2 \dots k_n u_1(x_1) u_2(x_2) \dots u_n(x_n) \dots (1)$$

$$\text{donde } 1 + k = \prod_{i=1}^n (1 + k k_i)$$

Donde $u_i(x_i)$ es la representación de la función de valor de atributo único para el indicador i con una escala de 0 a 1 y el peso del indicador i se representa por k_i .

El uso de formas simplificadas de la ecuación (1) permite que cada una de las preferencias posibles se vean reflejadas en el proceso de la evaluación comparativa. Se consideró que un modelo aditivo es razonable para resolver la implementación de agregaciones de juicios [24]. Resultando la siguiente ecuación:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) \dots (2)$$

donde:

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1$$

Con la finalidad de facilitar la interpretación de resultados es necesario considerar que los supuestos de independencia que pueden justificar el uso del modelo aditivo son razonables en la metodología KIND-ET debido a las relaciones entre los objetivos y las medidas.

La función de valor de atributo único otorga una medida de la utilidad que los tomadores de decisiones asignan a un determinado indicador, dicha función convierte los valores de los indicadores que se registran en unidades específicas a una escala adimensional que tiene un rango entre 0 y 1.

En la tabla 6 se muestran ejemplos de formas comunes de las funciones de valor de atributo único en las cuales destacan funciones lineales y exponenciales relacionadas con la tendencia de riesgo adoptada, si se tiene una neutralidad del riesgo asociado una fórmula lineal es la opción más adecuada, mientras que las funciones exponenciales son aptas para reflejar las actitudes de riesgo. [24]

Tabla 6. Funciones de valor de atributo único en KIND-ET.

Tipo	Funciones de valor decreciente	Funciones de valor creciente
Lineal	$V(x) = \frac{x^{max} - x}{x^{max} - x^{min}}$	$V(x) = \frac{x - x^{min}}{x^{max} - x^{min}}$
Exponencial	$V(x) = \frac{1 - \exp(a * \frac{x^{max} - x}{x^{max} - x^{min}})}{1 - \exp(a)}$	$V(x) = \frac{1 - \exp(a * \frac{x - x^{min}}{x^{max} - x^{min}})}{1 - \exp(a)}$
	Si $a > 0$ tendencia de propensión al riesgo (función convexa hacia abajo (cóncava hacia arriba)) Si $a < 0$ tendencia de aversión al riesgo (función convexa hacia arriba (cóncava hacia abajo))	
x^{max} y x^{min} son los valores de dominio máximo y mínimo de una función de valor de atributo único, que es razonable seleccionar lo más cerca posible entre sí para mejorar la resolución MAVT.		

Fuente: IAEA Nuclear Energy Series, "Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy Systems Options: Final Report of the Collaborative Project KIND", Viena, 2019.

El riesgo asociado es referenciado a la incertidumbre generada por las actitudes del tomador de decisiones respecto al aumento o disminución en los valores de los indicadores. Es así que las funciones de valor creciente están relacionadas a maximizar el valor de un indicador (una mayor

capacidad instalada o un mayor factor de planta) mientras que las funciones de valor decreciente se relacionan con minimizar el valor de un indicador (un menor costo de operación o una inversión menor).

Los factores de ponderación se convierten en el tema que requiere mayor análisis para la aplicación de los métodos MCDA, pues requieren precisión y razonamiento profundo para incluir la importancia relativa, tanto de los indicadores, las áreas de evaluación y los objetivos de alto nivel.

Para los objetivos de KIND-ET y la función de valor de múltiple atributo, la ecuación (2) se modifica de la siguiente manera:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(x_i) \dots (3)$$

donde

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Siendo w_i los factores de ponderación para cada indicador. El proceso de adición proporciona datos fiables para cada factor de ponderación con una sensibilidad a tendencias como el sesgo del grupo de expertos.

Con base en el árbol de objetivos, el cual se plantea como un árbol de objetivos de tres niveles, es necesario evaluar las ponderaciones para los objetivos de alto nivel, las ponderaciones para las áreas de evaluación y por ultimo las ponderaciones para los indicadores clave. Es necesario el uso de un procedimiento de ponderación jerárquica, donde el equipo de expertos determine los factores de ponderación con números reales entre 0 y 1 y que la suma de los factores de ponderación sea igual a 1. [24]

De acuerdo con los pesos se pueden generar valores finales para los factores de ponderación de la siguiente manera:

1. Para los objetivos de alto nivel:

$$\sum_{i=1}^{N_h} w_h^{i,j} = 1 \dots (4)$$

Donde N_h es el número de los objetivos de alto nivel y $w_h^{i,j}$ es el peso para el objetivo de alto nivel i .

2. Para las áreas de evaluación:

$$\sum_{j=1}^{N^i} w_a^{i,j} = 1 \dots (5)$$

Donde N^i es el número de áreas de evaluación del objetivo de alto nivel i y $w_a^{i,j}$ es un factor de ponderación para el área de evaluación j del objetivo de alto nivel i .

3. Para los indicadores dentro de cada área de evaluación:

$$\sum_{k=1}^{N^{i,j}} w_{ind}^{i,j,k} = 1 \dots (6)$$

Donde $N^{i,j}$ es el número de indicadores que contiene cada área de evaluación j del objetivo de alto nivel i y $w_{ind}^{i,j,k}$ es el peso del indicador k del área de evaluación j del objetivo de alto nivel i .

Entonces el factor de ponderación para cada indicador se determina como una serie de multiplicación de los pesos específicos normalizados [24]:

$$w_k = w_h^i * w_a^{i,j} * w_{ind}^{i,j,k} \dots (7)$$

4.2 Elaboración del árbol de objetivos

Para el árbol de objetivos es necesario establecer un conjunto de indicadores clave (Key Indicators, KI) e indicadores secundarios (secondary indicators, SI) para poder efectuar una evaluación comparativa de los sistemas de energía nuclear. Teniendo gran posibilidad de combinarse los diferentes indicadores en diferentes áreas y teniendo la posibilidad de centrarse en un número reducido de indicadores principales.

En la Figura 28 se muestra una plantilla de tres niveles donde los indicadores clave y secundarios se muestran en las figuras naranjas, las áreas de evaluación los recuadros verdes y los objetivos de alto nivel son los recuadros azules. Con esto se logra una manera simple y adecuada de evaluación para simplificar los factores de ponderación.

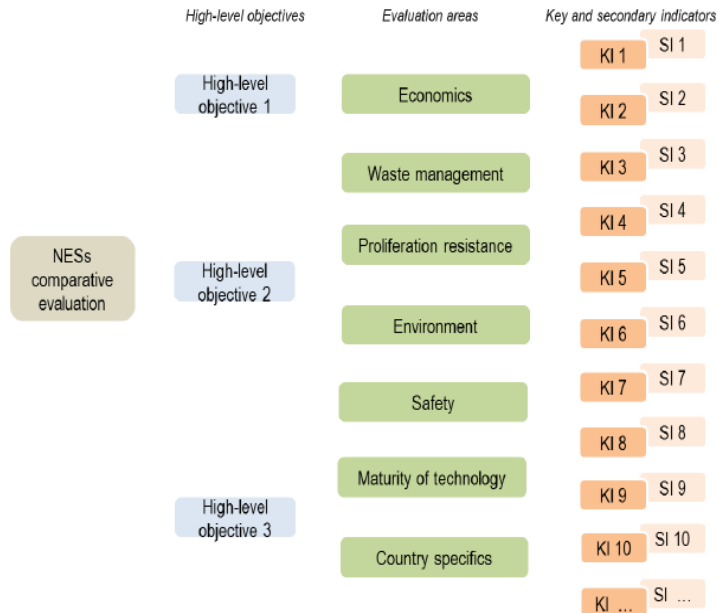


Figura 28. Árbol de objetivos.

Fuente: IAEA Nuclear Energy Series, "Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy Systems Options: Final Report of the Collaborative Project KIND", Viena, 2019.

Los indicadores claves son aquellos que proporcionan una mejor representación del sistema, generalmente medibles, cuyo objetivo es mostrar el desempeño de un sistema, siendo posible la necesidad de múltiples indicadores para una evaluación completa del sistema.

En nuestro caso de estudio surgió la necesidad de establecer los objetivos de alto nivel relacionándolos con la definición de desarrollo sostenible y los tres pilares de la sostenibilidad: economía, ambiente y social. De manera conjunta con los ODS en los que la energía nuclear se relaciona directamente obteniendo una primera clasificación que se muestra a continuación [26]:

- Pilar económico

- ODS 7: Energía asequible y no contaminante

El ODS 7 plantea garantizar el acceso a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, además de aumentar la proporción de energía renovable, duplicar la eficiencia energética, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles.

Debido a los objetivos del ODS 7, los indicadores considerados para el pilar económico relacionados con el ODS 7 son los siguientes:

- Capacidad de generación eléctrica
- Costo nivelado de energía
- Vida útil de la central de generación

- ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico

El ODS 8 busca lograr niveles elevados en cuestiones económicas mediante la diversificación, modernización, tecnología e innovación. Además de mejorar la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales, con la creación de empleo pleno, productivo y decente para todas las mujeres y hombres, logrando la igualdad de remuneración por trabajo.

Los indicadores para el ODS 8 son los siguientes:

- Empleos generados para operación
- Empleos generados para construcción

- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

La industria es parte importante en el desarrollo de un país, por lo que la innovación junto con los avances tecnológicos, logran una industria más eficiente y limpia.

La energía nuclear suministra electricidad confiable y limpia capaz de respaldar una industrialización sostenible donde se proporcione calor de proceso para diferentes usos como lo es calefacción, desalación de agua, producción de hidrógeno, calor de proceso para diferentes industrias.

Dentro del ODS 9 se consideran los siguientes indicadores:

- Tiempo de construcción de la central de generación eléctrica
- Factor de planta

- Pilar ambiental

- ODS 13: Acción por el clima

La energía nuclear otorga una opción de generación eléctrica limpia, capaz de satisfacer la demanda y respaldar a las energías renovables variables. Con el uso de reactores modulares pequeños la huella de carbono de la energía nuclear se ve disminuida, proporcionando una alternativa de generación eléctrica limpia que contribuye con la descarbonización del sector eléctrico y utilizando tecnologías de generación modernas.

En el ODS 13 se puede considerar el siguiente indicador:

- Estado de desarrollo

- ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres

El uso de tierra para actividades humanas como industria, vivienda, agricultura y ganadería, ha mermado los recursos naturales de la tierra, dejando de ser sostenibles pues la capacidad de regeneración de los recursos se ha visto rebasada por el consumo de recursos.

La energía nuclear requiere menor cantidad de área para la generación de energía, comparada con otras fuentes de generación bajas en carbono. Con la implementación de reactores modulares pequeños, se optimizan las áreas destinadas para centrales de generación, ocupando menores áreas por unidad de generación y dejando mayor ocupación de tierra para la regeneración de la capacidad de absorción de emisiones del planeta. Los indicadores involucrados son los siguientes:

 - Uso de suelo
 - Sismicidad
- Pilar social
 - ODS 6: Agua limpia y saneamiento

Uno de los recursos vitales para la humanidad es el agua, siendo clave para el desarrollo de la sociedad, de igual manera es importante en diferentes sectores y el sector de generación eléctrica es uno de ellos.

Sin embargo, la energía nuclear como fuente de generación eléctrica limpia tiene la capacidad de ser una fuente de agua mediante el proceso de desalinización de agua de mar (cogeneración nuclear), permitiendo obtener agua limpia usando calor de proceso proveniente de las centrales de generación nuclear.

Con el ODS 6 se ubican los siguientes indicadores:

 - Flujo nominal de agua de enfriamiento
 - ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

Electrificar las ciudades es un punto necesario para disminuir la contaminación del aire, de la mano con la electrificación de diversos sectores que dependen de combustibles fósiles, como lo son el transporte y la industria. Esto genera un aumento en la demanda de electricidad, surgiendo así la necesidad de implementar energías limpias y renovables para satisfacer dicha demanda. Así mismo, en comunidades con difícil acceso a las redes eléctricas del SEN, los reactores modulares pequeños se presentan como una alternativa adecuada para el suministro limpio de electricidad y calor. Se consideran los siguientes indicadores:

 - Tiempo para su primera construcción a partir de 2023
 - Frecuencia de daño al núcleo

El árbol de objetivos se estructura de manera jerárquica en tres niveles: objetivos de alto nivel, las áreas de evaluación y los indicadores clave, cuyo objetivo es mostrar el desempeño de un sistema, siendo posible la necesidad de múltiples indicadores para una evaluación completa del sistema. Se trabajará con el árbol de objetivos de la Figura 29.

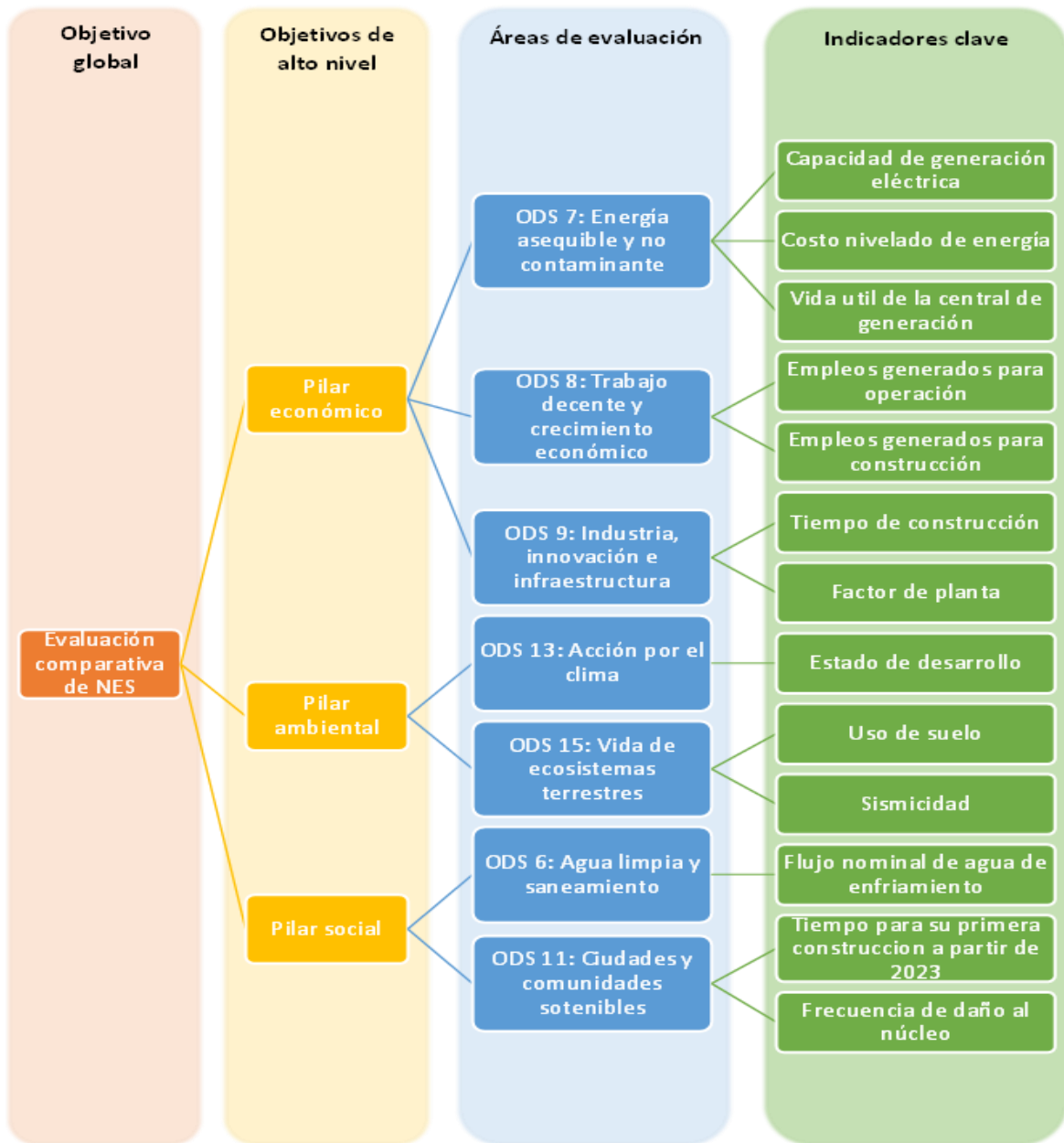


Figura 29. Árbol de objetivos basado en los ODS.

En la Tabla 7 se muestran los indicadores de evaluación, en nuestro caso de estudio surgió la necesidad de establecer los objetivos de alto nivel relacionándolos con los tres pilares de la sostenibilidad: economía, ambiente y social. Se incluye una columna para el pilar de la sostenibilidad, una para el ODS que se evalúa, otra con el nombre del indicador y una para su descripción, sigue la unidad de medida y por último, una columna con la meta, es decir, la preferencia para mejorar la sostenibilidad.

Tabla 7. Indicadores de evaluación.

Pilar	ODS	Indicador	Descripción	Unidad de medida	Meta
Económico	ODS 7	Capacidad de generación eléctrica	Es la potencia máxima, especificada por el fabricante, que una central de generación eléctrica puede ofrecer.	[MWe]	Min
Económico	ODS 7	Costo nivelado de energía	El costo nivelado de energía permite conocer el costo de producir electricidad considerando los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como de combustible a lo largo de la vida útil de la central de generación eléctrica.	[\$/MWh]	Min
Económico	ODS 7	Vida útil de la central de generación	Se refiere al tiempo de vida en que la central de generación se mantendrá en operación.	[años]	Max
Económico	ODS 8	Empleos para operación	La cantidad de empleos que genera la central de generación durante su operación.	[empleos/MW-año]	Max
Económico	ODS 8	Empleos para construcción	La cantidad de empleos que genera la central de generación durante su construcción.	[empleos/MW-año]	Max
Económico	ODS 9	Tiempo de construcción	Indica el tiempo estimado en el cual se llevará a cabo la construcción de la central de generación.	[meses]	Min
Económico	ODS 9	Factor de planta	Se refiere a la relación que existe entre la cantidad de energía eléctrica producida respecto a la energía eléctrica que se genera a plena potencia.	%	Max
Económico	ODS 13	Estado de desarrollo	Hace referencia al estatus actual de la tecnología, considerando si está en etapas de diseño, si se encuentra en proceso de licenciamiento, si cuenta con licenciamiento, se tiene alguna instalación en operación.	Escala numérica	Max
Ambiental	ODS 15	Uso de suelo	Es la extensión de terreno requerida para la construcción de las instalaciones de la central de generación nuclear.	[m ² /MW]	Min
Ambiental	ODS 15	Sismicidad	Magnitud de tolerancia a aceleración sísmica que soporta el reactor.	[g]	Max
Social	ODS 6	Flujo nominal de agua de enfriamiento	Se refiere a los requerimientos necesarios de agua de enfriamiento de cada tipo de central de generación.	[t/MW]	Min
Social	ODS 11	Tiempo para su primera construcción a partir de 2023	El tiempo en años para la primera construcción de una central de su tipo a partir del año 2023.	[años]	Min
Social	ODS 11	Frecuencia de accidentes (daño al núcleo)	La frecuencia de daños al núcleo (CDF) es un término utilizado en la evaluación de riesgos probabilísticos (PARA) que indica la probabilidad de un accidente que causaría daños graves al combustible nuclear en el núcleo de un reactor nuclear.	Valor/[reactor-año]	Min

Para fines de la comparación de los tres reactores del presente análisis, se ha seleccionado como objetivo favorecer a los reactores de pequeña capacidad para poder ser instalados en sitios con demandas de energía no muy grandes. En la Tabla 8 se muestran los nombres de los indicadores, la unidad de medida, los valores obtenidos para cada uno de los reactores, las referencias, así como los valores supuestos [sup]. Cabe señalar que existen algunos valores estimados debido a la información comercial disponible por parte de los fabricantes o desarrolladores que aún están trabajando en fases de implementación de las tecnologías.

Tabla 8. Valores de los indicadores de evaluación.

Indicador	Unidad	BWRX-300 Valor	BWRX-300 Referencia	VOYGER-6 Valor	VOYGER-6 Referencia	SMART 100 Valor	SMART 100 Referencia
Capacidad de generación eléctrica	[MWe]	270-290	[16], [18]	308, 426, 924	[20], [21]	100-110	[32]
Costo nivelado de energía	[\$/MWh]	35-50	[27], [28]	40-65	[21]	71.9-202.9	[33]
Vida útil de la central de generación	[años]	60	[16], [27]	60	[21], [30]	60	[16], [32]
Empleos para operación al año	[empleos/año]	210	[26]	667	[16]	200	[sup]
Empleos para construcción	[empleos/año]	1640	[26]	1600	[16]	1609	[sup]
Tiempo de construcción	[meses]	26	[27]	36	[21]	38	[sup]
Factor de planta	[%]	95	[16], [27]	97	[sup], [30]	96	[sup], [31]
Estado de desarrollo	[escala numérica]	2	[sup], [16]	4	[sup], [30]	1	[sup], [16], [31]
Uso de suelo	[m ²]	26,300	[16]	140,000	[30]	90,000	[16]
Sismicidad	[g]	0.3	[16], [27]	0.5 horizontal/0.4 vertical	[16], [30]	0.3	[16], [31]
Flujo nominal de agua de enfriamiento	[t/MWh]	1530	[16], [27]	666	[16], [30]	2507	[16], [31]
Tiempo para su primera construcción a partir de 2023	[años]	5	[16], [27]	4	[16], [30]	6	[16], [31]
Frecuencia de daño al núcleo	Valor/[reactor-año]	10 ⁻⁷	[27]	3 ⁻¹⁰	[21]	2 ⁻⁷	[16]

4.3 Tabla de desempeño

La tabla de desempeño, Tabla 9, refleja la estructura organizada con base en la jerarquía proporcionada en el árbol de objetivos. La puntuación estará sujeta a las unidades del indicador y los valores que se manejan en cada uno de ellos.

Tabla 9. Tabla de desempeño.

Objetivos de Alto Nivel	Nombres de las Áreas	Nombres de los Indicadores	Abreviación de los Indicadores	Calificación MIN	Calificación MAX	BWRX-300	VOYGR	SMART
Pilar Económico	ODS 7: Energía asequible y no contaminante	Capacidad de generación eléctrica	KI-1	110	426	290	426	110
Pilar Económico	ODS 7: Energía asequible y no contaminante	Costo nivelado de energía	KI-2	50.00	202.90	50.00	65.00	202.90
Pilar Económico	ODS 7: Energía asequible y no contaminante	Vida útil de la central de generación	KI-3	60	60	60	60	60
Pilar Económico	ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	Empleos generados para operación	KI-4	0.72	1.82	0.72	1.57	1.82
Pilar Económico	ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	Empleos generados para construcción	KI-5	3.76	14.63	5.53	3.76	14.63
Pilar Económico	ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	Tiempo de construcción	KI-6	26	38	26	36	38
Pilar Económico	ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	Factor de planta	KI-7	95	97	95	97	96
Pilar Económico	ODS 13: Acción por el clima	Estado de desarrollo	KI-8	1	4	2	4	1
Pilar Ambiental	ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	Uso de suelo	KI-9	90.69	818.18	90.69	164.32	818.18
Pilar Ambiental	ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	Sismicidad	KI-10	0.30	0.40	0.30	0.40	0.30
Pilar Social	ODS 6: Agua limpia y saneamiento	Flujo nominal de agua de enfriamiento	KI-11	666	2,507	1,530	666	2,507
Pilar Social	ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	Tiempo para su primera construcción	KI-12	5	7	5	6	7
Pilar Social	ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	Frecuencia de daño al núcleo	KI-13	3E-10	1E-06	1E-06	3E-10	2E-07

Con base en el árbol de objetivos, se elaboró la Tabla 10 con los respectivos factores de ponderación, otorgándole el mayor peso al pilar económico, seguido del pilar ambiental y por último el pilar social.

Tabla 10. Factores de peso.

Objetivos de Alto Nivel	Pesos de Objetivos	Nombres de Áreas	Pesos de Áreas	Nombres de Indicadores	Pesos de Indicadores	Pesos Finales
Pilar Económico	0.400	ODS 7: Energía asequible y no contaminante	0.4	KI-1	0.3	0.048
Pilar Económico	0.400	ODS 7: Energía asequible y no contaminante	0.4	KI-2	0.5	0.080
Pilar Económico	0.400	ODS 7: Energía asequible y no contaminante	0.4	KI-3	0.2	0.032
Pilar Económico	0.400	ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	0.3	KI-4	0.5	0.060
Pilar Económico	0.400	ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	0.3	KI-5	0.5	0.060
Pilar Económico	0.400	ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	0.3	KI-6	0.7	0.084
Pilar Económico	0.400	ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	0.3	KI-7	0.3	0.036
Pilar Ambiental	0.300	ODS 13: Acción por el clima	0.3	KI-8	1.0	0.090
Pilar Ambiental	0.300	ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	0.7	KI-9	0.5	0.105
Pilar Ambiental	0.300	ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	0.7	KI-10	0.5	0.105
Pilar Social	0.300	ODS 6: Agua limpia y saneamiento	0.3	KI-11	1.0	0.090
Pilar Social	0.300	ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	0.7	KI-12	0.5	0.105
Pilar Social	0.300	ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	0.7	KI-13	0.5	0.105

4.4 Tabla de función de valor de atributo único

Dentro de la tabla de valores de la función de atributo, Tabla 11, la hoja de trabajo calcula los valores de las funciones de valor de un solo atributo, dependiendo de una función lineal o exponencial de valor creciente o decreciente. El uso de un valor creciente o decreciente dependerá de los objetivos establecidos, se puede buscar minimizar un valor, por ejemplo, costos, o maximizar un valor como lo puede ser la generación de empleos. Es importante que se ha dado preferencia a la opción de más baja potencia con el objetivo de poder considerar una variedad más amplia de sitios en los que se podría instalar un SMR en el Sistema Eléctrico Nacional.

Tabla 11. Funciones de valor de atributo único.

Objetivos de Alto Nivel	Nombres de Áreas	Nombre Abreviado Indicador	Meta	BWRX-300	VOYGR	SMART
Pilar Económico	ODS 7	KI-1	min	0.430	0.000	1.000
Pilar Económico	ODS 7	KI-2	min	1.000	0.902	0.000
Pilar Económico	ODS 7	KI-3	max	0.000	0.000	0.000
Pilar Económico	ODS 8	KI-4	max	0.000	0.769	1.000
Pilar Económico	ODS 8	KI-5	max	0.163	0.000	1.000
Pilar Económico	ODS 9	KI-6	min	1.000	0.167	0.000
Pilar Económico	ODS 9	KI-7	max	0.000	1.000	0.500
Pilar Ambiental	ODS 13	KI-8	max	0.333	1.000	0.000
Pilar Ambiental	ODS 15	KI-9	min	1.000	0.899	0.000
Pilar Ambiental	ODS 15	KI-10	max	0.000	1.000	0.000
Pilar Social	ODS 6	KI-11	min	0.531	1.000	0.000
Pilar Social	ODS 11	KI-12	min	1.000	0.500	0.000
Pilar Social	ODS 11	KI-13	min	0.000	1.000	0.800

*Se aplicó una fórmula de normalización lineal con potencia exponencial igual a 1 y usando valores locales de la tabla para normalización.

4.5 Clasificación de Resultados

La hoja de trabajo de la clasificación de los resultados es la principal lista donde se interpretan los resultados del cálculo y formulan recomendaciones para los tomadores de decisiones. Se muestran en la Tabla 12 conforme a la información de los objetivos de alto nivel de las funciones de valor multi-atributo.

Tabla 12. Calificaciones resultantes.

Reactor	BWRX-300	VOYGR	SMART
Función de valor multiatributo	0.461	0.716	0.287
Calificaciones de los objetivos de alto nivel con pesos base			
Pilar Económico	0.194	0.168	0.186
Pilar Ambiental	0.135	0.289	0.000
Pilar Social	0.132	0.258	0.101
Calificaciones de las áreas con pesos base			
ODS 7: Energía asequible y no contaminante	0.101	0.072	0.048
ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	0.010	0.046	0.120
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	0.084	0.050	0.018
ODS 13: Acción por el clima	0.030	0.090	0.000
ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	0.105	0.199	0.000
ODS 6: Agua limpia y saneamiento	0.048	0.090	0.000
ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	0.084	0.168	0.101

Dentro de la función de valor multiatributo encontramos al reactor VOYGR como el reactor mejor puntuado en el estudio pues obtuvo una puntuación de 0.716 en comparación con el reactor BWRX-300 que representó una puntuación de 0.461, y el reactor SMART obtuvo una puntuación de 0.287 siendo la menos significativa (Ver Figura 30).

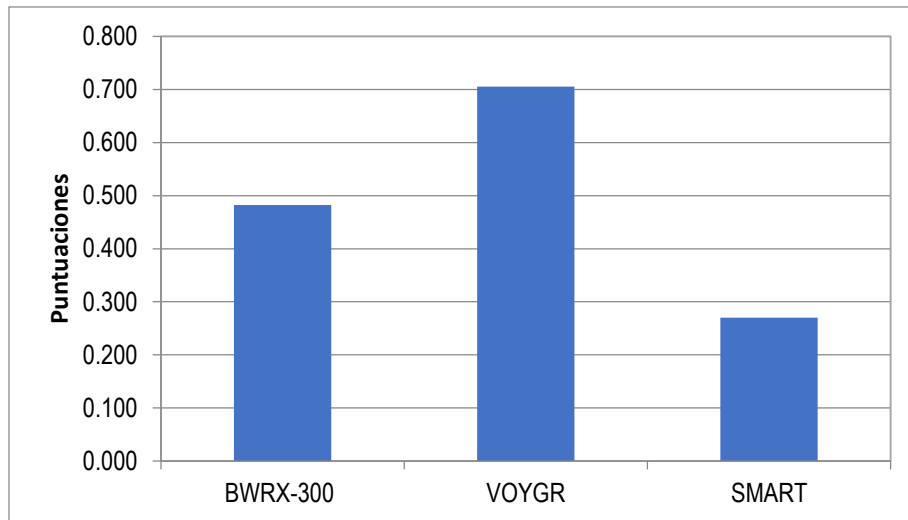


Figura 30. Puntuaciones resultantes de la función multiatributo.

Como se observa en la Figura 31, el pilar ambiental es el objetivo de alto nivel con mayor aportación en el reactor VOYGR, con un valor de 0.289. En cuanto al reactor BWRX-300, el pilar económico es el objetivo de alto nivel con mayor aportación en los puntajes del reactor, con un valor de 0.194, de igual manera el pilar económico es el mejor calificado en el reactor SMART con 0.186 y siendo notable la nula participación del pilar ambiental debido a que el reactor SMART cuenta con la mayor extensión de terreno de los tres reactores.

Las puntuaciones varían de acuerdo con los resultados arrojados de las mediciones de objetivos de alto nivel en el esquema de la metodología global debido a que se hace un análisis general basado en los resultados particulares de cada reactor.

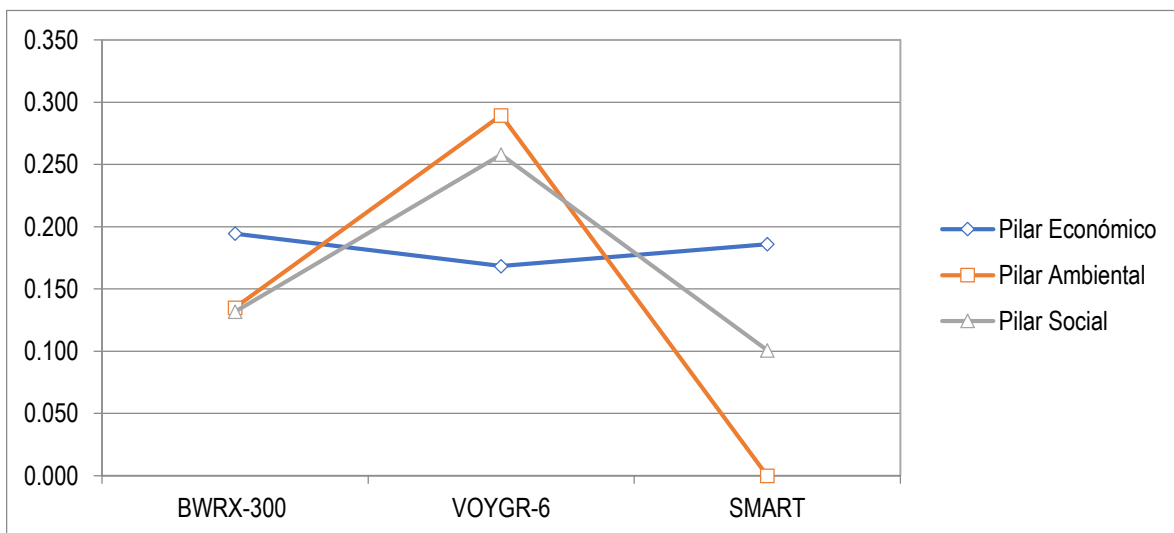


Figura 31. Puntuaciones de los objetivos de alto nivel.

Dentro de la Figura 32, el reactor VOYGR cuenta con las mejores puntuaciones en el ODS 11 y el ODS 15, gráficamente se muestra que el ODS 8 y el ODS 11 son los de mayor contribución al puntaje del reactor SMART, seguido del ODS 11. Mientras que el reactor BWRX-300 tiene como área con mejor puntuación al ODS 15 y en segundo lugar el ODS 11. Es notable que en las puntuaciones de área del reactor SMART, tres áreas se encuentran con una puntuación de 0.000 y se ven reflejadas en la puntuación general del reactor, posicionándolo en el tercer lugar.

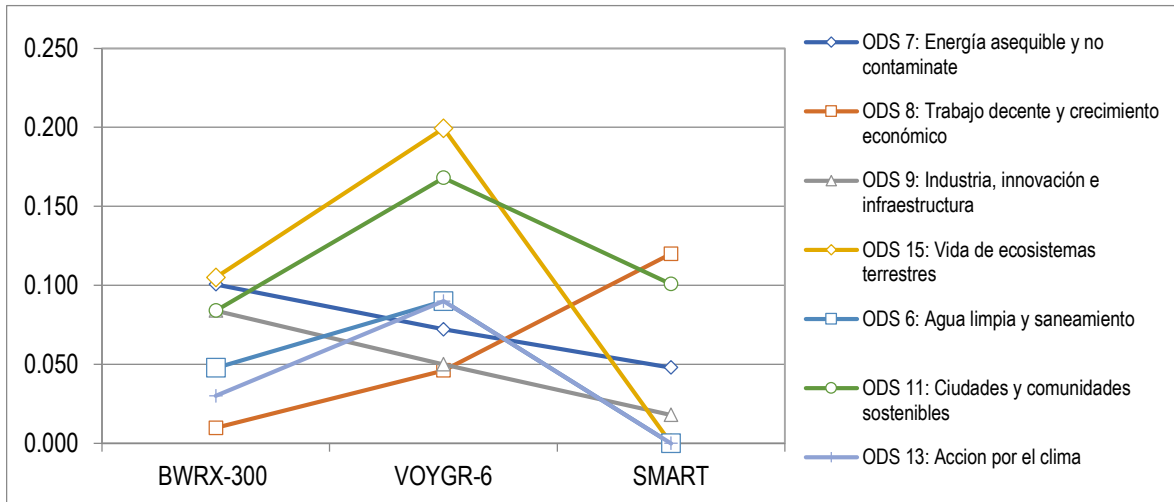


Figura 32. Puntuaciones de las áreas de evaluación.

4.6 Análisis de sensibilidad de los pesos

El análisis de sensibilidad otorga la capacidad de efectuar un estudio de sensibilidad sencillo de los valores de los factores de ponderación. Los valores que corresponden a las funciones de valores de atributos múltiples se denominan “caso base”. En el análisis de sensibilidad de la Tabla 14 se modifican los pesos para los factores de ponderación y se realiza una comparación entre el caso base y el caso modificado. Como ejemplo del análisis de sensibilidad se modificaron los pesos de los objetivos de alto nivel como se muestra en la Tabla 13. Se hicieron otras pruebas de pesos y se pudo observar que el VOYGR siempre queda mejor calificado y es debido a sus atributos.

Tabla 13. Tabla de pesos de los objetivos de alto nivel.

	Pesos Base	Pesos Modificados
Pilar Económico	0.4	0.3
Pilar Ambiental	0.3	0.2
Pilar social	0.3	0.5

Tabla 14. Puntuaciones sensibilidad de los pesos.

		BWRX-300	VOYGR	SMART
Sensibilidad de los pesos	Caso Base	0.461	0.716	0.287
	Caso Modificado	0.455	0.749	0.308

De manera gráfica en la Figura 33 se muestra que debido a la modificación realizada el reactor BWRX-300 disminuye su puntuación llegando a 0.455 en la sensibilidad de los pesos, mientras el reactor VOYGR registra un aumento a 0.749 y el reactor SMART registra una puntuación mayor llegando a 0.308, siendo notable que el BWRX-300 se mantiene como el segundo mejor calificado.

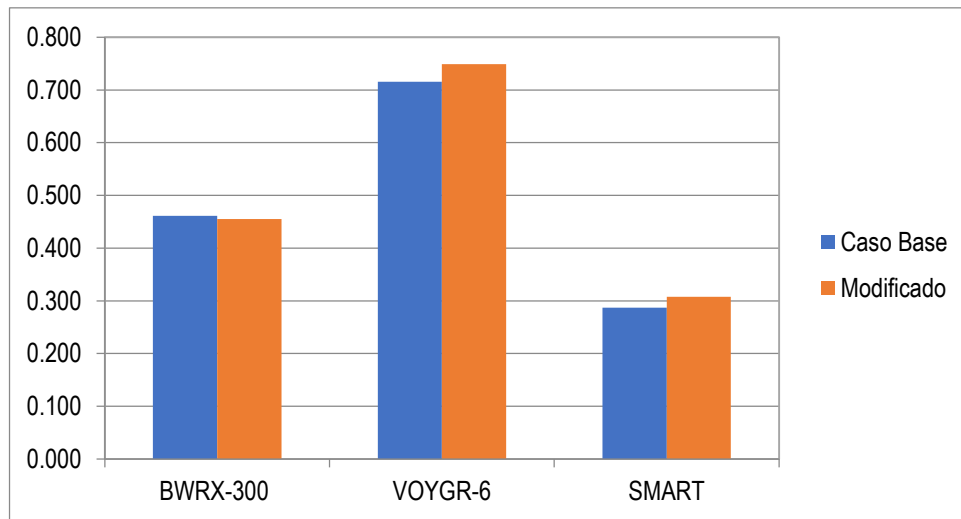


Figura 33. Puntuaciones caso modificado de la sensibilidad de los pesos.

Se obtiene como resultado dos principales reactores para considerar en un despliegue nuclear en México, el reactor VOYGR de NuScale como el mejor calificado en nuestro análisis debido a la participación principal de los ODS 11 y 15, mientras que el reactor BWRX-300 se posiciona como el segundo mejor calificado en nuestro análisis. Las principales ventajas de las centrales VOYGR es la factibilidad de generación eléctrica flexible, pues el fabricante ofrece tres diferentes configuraciones con la ventaja de generar electricidad con el primer reactor instalado mientras el resto sigue en construcción. Además del desarrollo en la implementación y certificaciones, debido a ser el reactor más avanzado en estos temas.

El reactor BWRX-300 presenta mejores rendimientos económicos en cuanto a LCOE con una unidad de generación de 300 [MWe] lo que los posiciona como una gran opción en la expansión de energía nuclear en México. Gracias a la capacidad de generación de 110 [MWe] el reactor SMART se presenta como una segunda opción para considerarse para una futura expansión de la energía nuclear en el país, pues el desarrollo en investigaciones y licenciamientos proveerá un reactor competitivo económicamente para nuestro país.

Del análisis de sensibilidad podemos notar la influencia de los pesos en el análisis pues al determinar darle mayor peso al pilar ambiental y menor peso al pilar social, el reactor BWRX-300 resulta el segundo mejor calificado. Se puede concluir que en base a las necesidades de nuestro país ambos reactores son opciones viables dependiendo del desarrollo tecnológico que tengan a lo largo del tiempo. Para una planeación energética futura, se puede considerar incluir unidades de generación de 2-4 módulos con la finalidad de disminuir los costos de construcción, logrando proyectos óptimos y con mayor tiempo de operación.

4.7 Extensiones KIND-ET

Las extensiones funcionales de KIND-ET son creadas para extender la capacidad de toma de decisiones de los expertos para realizar los análisis con respecto a las ponderaciones, los indicadores clave y funciones de valor de atributo único. Se han pensado como herramientas independientes para profundizar el análisis mediante el ingreso de datos obtenidos previamente de un modelo KIND-ET. [30]

Se incorporan en el estudio tres extensiones de KIND-ET:

- **Identificador de dominación**
Es una extensión analítica usada para la identificación de opciones dominantes y no dominantes de entre un conjunto de múltiples opciones evaluadas.
- **Creador de puntuación general**
Esta extensión se usa para evaluar los diferenciales causados por incertidumbre en las puntuaciones generales de las opciones estudiadas.
- **Mapeo de datos**
Es una herramienta de visualización que resalta las opciones en las cuales se tienen el primer rango en las ponderaciones de los objetivos de alto nivel.

4.7.1 Identificador de Dominación

Resulta de gran utilidad en la comparación de NES la identificación de opciones dominantes y opciones dominadas dentro de un conjunto de múltiples opciones evaluadas. Siendo una opción dominada aquella en la que los indicadores de desempeño tienen valores de puntuación inferiores con respecto a las opciones restantes o dominantes. En un grupo con una cantidad grande de opciones a evaluar las opciones dominadas facilitan la comparación pues se pueden excluir para minimizar las opciones consideradas.

En la Figura 34, podemos observar que las opciones dominantes son aquellas que se encuentran resaltadas en verde y con un símbolo “<”, siendo concluyente que la opción 1c es dominada por la opción 1b y la opción 3bv es dominada por la opción 3b. [34]

Domination table		Dominating options											
		1a	1b	1c	2a	2b	2c	2cV	3a	3b	3bV	3cV1	3cV2
Dominated options	1a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1c	-	<	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2cV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3bV	-	-	-	-	-	-	-	-	<	-	-	-
	3cV1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3cV2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 34. Tabla de dominancia.

Fuente: IAEA, Users Instructions for Extensions of KIND-ET. The INPRO/IAEA project on Comparative Evaluation of Nuclear Energy Systems Options, Viena 2019

En la Tabla 15 se muestran los datos obtenidos por el identificador de dominancias para la evaluación de los tres reactores considerados en nuestra investigación. Se puede observar que en los tres NES no se encuentran diferencias en cuanto a dominancias, debido a que el análisis de los tres reactores se basa en la tabla funciones de valor de atributo único (Tabla 10) y no se obtiene un

NES con mayor cantidad de indicadores que resulten con una puntuación de 1 junto con un reactor que obtenga calificaciones la mayor cantidad de indicadores con una puntuación de 0, concluyendo que no existen dominancias entre los tres distintos NES y siendo difícil descartar alguno de los tres reactores.

Tabla 15. Tabla de dominancia caso de estudio.

Tabla de dominación		Opciones Dominantes		
		BWRX-300	VOYGR	SMART
Opciones Dominantes	BWRX-300		-	-
	VOYGR	-		-
	SMART	-	-	

En la Figura 35 podemos observar al reactor VOYGR como el reactor que más indicadores clave tiene con una puntuación de 1.0, seguido por el reactor BWRX-300 que cuenta con cuatro indicadores con una puntuación de 1.0, sin embargo, también cuenta con indicadores con calificaciones de 0, al igual que el reactor SMART que presenta tres indicadores con puntuación de 1.0, y 8 indicadores con puntuaciones de 0, motivo de ser el tercer reactor posicionado en nuestro análisis.

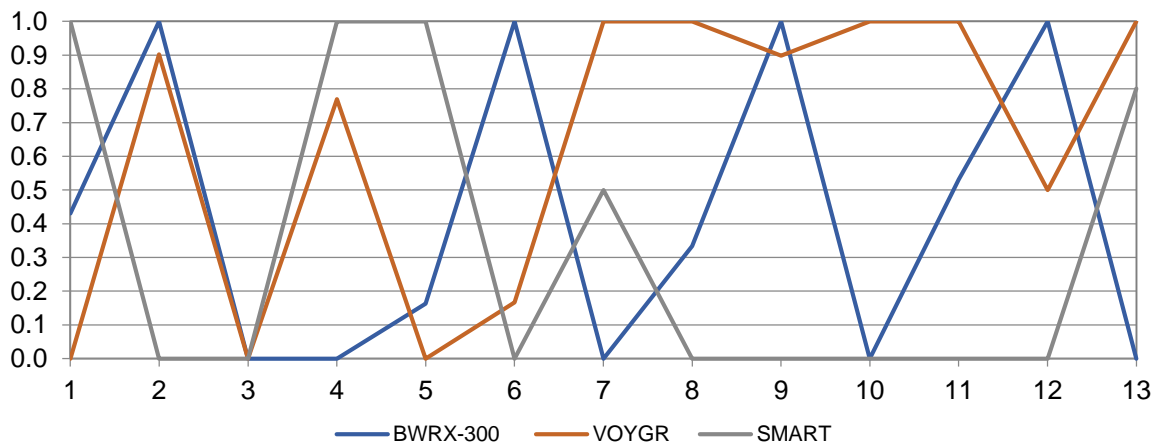


Figura 35. Indicadores dominantes.

4.7.2 Generador de diferenciales de puntuación general

En cualquier estudio de decisiones, es de interés estimar la probabilidad del orden de clasificación de las opciones para diferentes preferencias de las partes interesadas. El examen del impacto de la incertidumbre de los factores de ponderación en los resultados de la clasificación puede realizarse utilizando la variación probabilística de las ponderaciones relativas del indicador individual, lo que permite determinar las distribuciones de probabilidad de las puntuaciones y clasificaciones de las opciones, teniendo en cuenta las incertidumbres de los factores de ponderación. [34]

Dentro de este enfoque, todos los pesos están distribuidos aleatoria y uniformemente en el rango de 0 a 1, restringidos únicamente por las condiciones de normalización. Las distribuciones de probabilidad son generadas mediante simulaciones de Monte Carlo, para realizar una evaluación de la probabilidad de orden de alternativas. Se precisan 10,000 combinaciones de ponderaciones para

obtener una estimación confiable de las distribuciones de probabilidad para las puntuaciones de cada NES. [34]

La dispersión de las puntuaciones globales para todas las opciones consideradas debido a las incertidumbres en los factores de ponderación puede representarse mediante un diagrama de caja y bigotes que permite una interpretación dinámica de la clasificación y muestra las competencias entre opciones en función de las variaciones de ponderación.

La construcción de un diagrama de cajas y bigotes es con base en los cuartiles de un conjunto de datos, los cuartiles son valores que dividen un conjunto de datos en 4 partes iguales (Q1, Q2, Q3). En la Figura 36 se muestra la estructura de un diagrama de cajas y bigotes, donde el primer cuartil (Q1) es el cuartil que contiene el percentil 25 o el 25% de datos, el cuartil 2 (Q2) es la mediana del conjunto de datos o el percentil 50, el cuartil 3 (Q3) es el conjunto de datos superior correspondiente al percentil 75 del conjunto de datos.

La distancia entre Q3 y Q1 se conoce como el rango intercuartil (IQR), mediante el rango intercuartil se conocen los bigotes (whiskers) del conjunto de datos, pues cada bigote se extiende a los puntos más bajo y más alto mediante el uso de 1.5 veces el intercuartil desde Q3 para el bigote superior y Q2 para el bigote inferior.

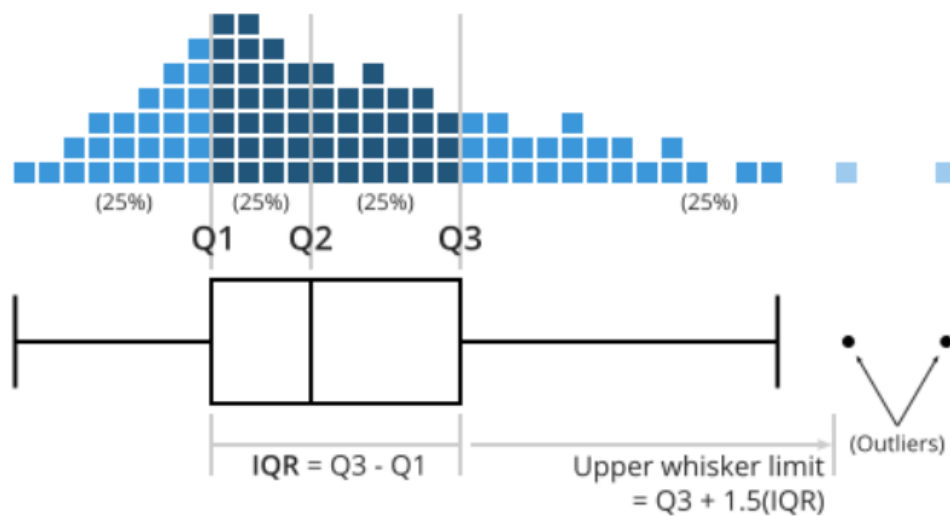


Figura 36. Diagrama de cajas y bigotes.

Fuente: <https://chartio.com/learn/charts/box-plot-complete-guide/>

Para el análisis realizado, en la Figura 37, podemos observar que los valores para las medias de los tres reactores son diferentes entre sí y de igual manera indican datos asimétricos en los tres reactores, mientras que no muestran valores atípicos y los rangos de valores de las cajas para el reactor BWRX-300 y el reactor VOYGR se superponen de manera notable, en contraste con el reactor SMART.

El reactor BWRX-300 presenta una media de 0.42 y una mediana de 0.40, lo que nos indica que los datos no son normalmente distribuidos y presentan un ligero sesgo positivo pues la media es

ligeramente mayor que la mediana, de igual manera el bigote superior y la media caja superior son mayores que sus contrapartes.

El reactor VOYGR muestra una media de 0.67 y una mediana de 0.73, esto es indicativo de un sesgo ligeramente negativo dado que la media es ligeramente menor que la mediana, al igual que el bigote inferior es más largo que el bigote superior y la media caja inferior es ligeramente mayor que la media caja superior.

En cuanto al reactor SMART, se obtuvo una media de 0.31 y una mediana de 0.23, resultando un sesgo positivo al presentar una media mayor a la mediana, es notable que el bigote superior es más grande que el bigote inferior, así como la media caja superior es más grande que la media caja inferior.

Analizando las cajas podemos observar que el reactor BWRX-300 tiene un rango intercuartil de 0.48, siendo mayor que el reactor VOYGR con 0.39 y ligeramente mayor que el reactor SMART con 0.47, lo que indica una mayor dispersión en los datos del reactor BWRX-300 y siendo el reactor VOYGR el que cuenta con la menor dispersión en los datos.

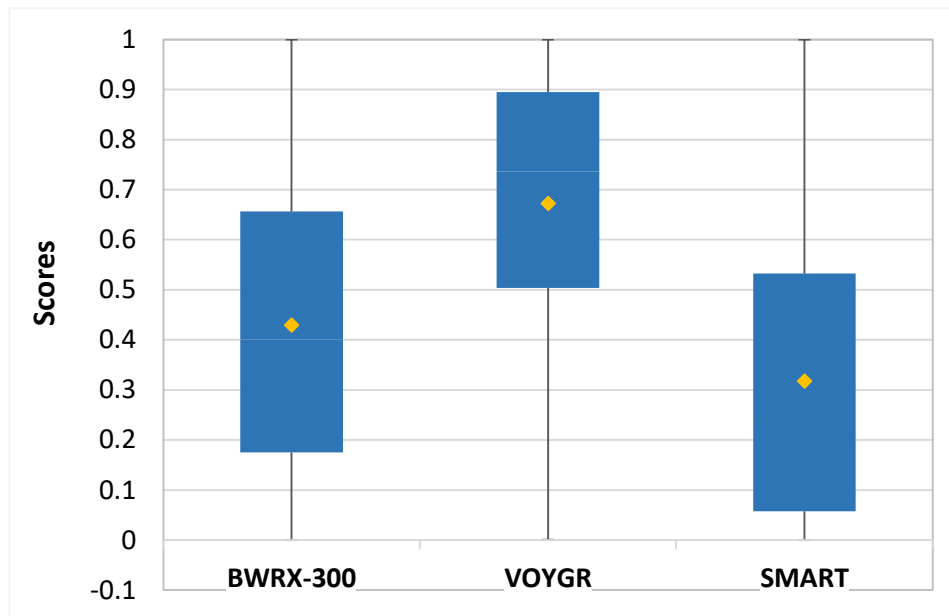


Figura 37. Diagrama de cajas y bigotes.

Con el análisis de dispersión realizado podemos afirmar que los puntajes aplicados a los indicadores nos arrojan valores en la función de valor multiatributo óptimos dentro de un rango esperado y con un comportamiento similar en cuanto a dispersión esperada, pues el reactor VOYGER resulta con menor dispersión en los datos y una media mayor.

4.7.3 Mapeo de datos

El mapeo de datos es una herramienta extensión de KIND-ET que proporciona un análisis con respecto a las ponderaciones de los objetivos de alto nivel. Los resultados se presentan en forma de mapas de calor para cada ponderación de los objetivos de alto nivel.

Para la construcción del mapeo, las ponderaciones de los tres objetivos se deben calcular entre un rango de 0 a 1 y de manera simultánea. Debido a la normalización, que limita la suma a la unidad,

sólo dos ponderaciones (w_1, w_2) pueden ser seleccionadas de manera individual, mientras que la ponderación w_3 resulta de la siguiente ecuación:

$$w_3 = 1 - (w_1 + w_2) \dots (8)$$

Donde

$$(w_1 + w_2) \leq 1 \dots (9)$$

Las combinaciones de pesos en las cuales una opción es dominante serán determinadas por las áreas que resulten coloreadas, indicando que una opción específica tendrá el primer lugar. De igual manera se pueden realizar diversas configuraciones para las ponderaciones de los objetivos de alto nivel, teniendo w_2 vs w_3 o w_1 vs w_3 como parámetros independientes para la ponderación con la finalidad de identificar opciones prometedoras. [34]

La aplicación de este análisis permite presentar mapas que examinan diferentes opciones con preferencias distintas y el conjunto de mapas permitirá identificar qué opciones son consistentes y determinar si es necesaria una segunda ronda de evaluación comparativa por parte de los tomadores de decisiones. En la Figura 38 se muestran los mapas de calor para el análisis del pilar económico y el pilar ambiental, siendo las mejores puntuaciones aquellas en verde y las peores puntuaciones aquellas resaltadas en color rojo.

Se puede observar que las mejores puntuaciones del reactor BWRX-300 son en el pilar económico mientras que las puntuaciones menos significativas se encuentran en el pilar ambiental. En comparación, el reactor SMART tiene sus mejores puntuaciones en el pilar económico, siendo ligeramente menores que las puntuaciones del reactor BWRX-300. Analizando el reactor VOYGR, sus mejores puntuaciones se encuentran en el pilar ambiental y son mayores que en los otros dos reactores.

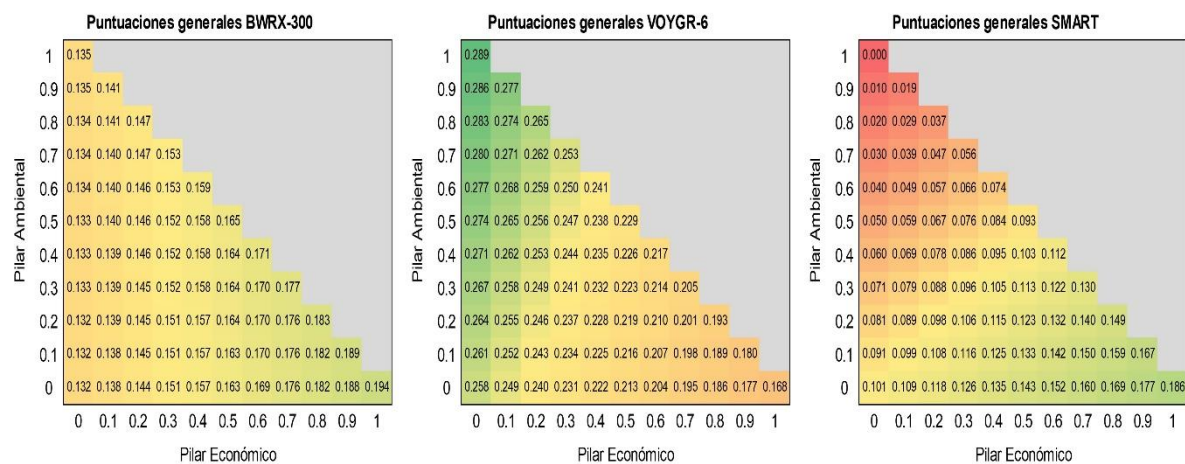


Figura 38. Mapeo de calor de las puntuaciones generales pilar económico vs pilar ambiental.

Derivado de lo anterior, en la Figura 39, resultado del análisis se puede observar que el reactor BWRX-300 es el mejor puntuado en el pilar económico, siendo el menor puntuado en el pilar ambiental, mientras que el reactor SMART no tiene presencia en el mapeo final pues los valores de las puntuaciones son inferiores en comparación con los otros reactores. De igual manera es notable

la presencia del reactor VOYGR-6, pues se ubica en la mayor parte del mapeo, con un buen balance entre el pilar económico y el pilar ambiental.

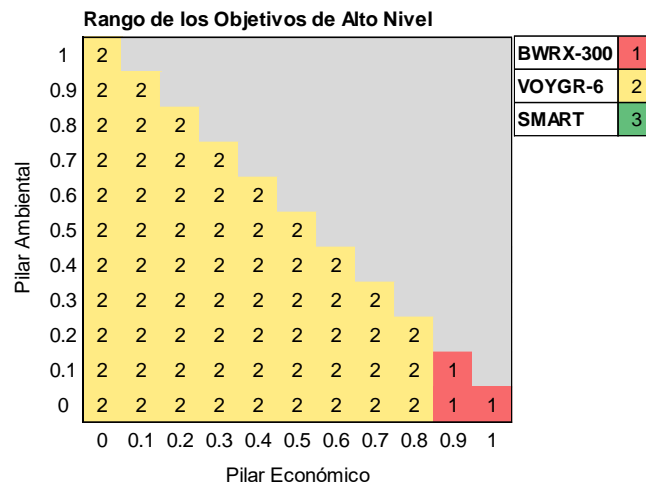


Figura 39. Mapeo pilar económico vs pilar ambiental.

En la Figura 40 se muestra el mapeo para el pilar económico y el pilar social, en donde los resultados arrojan puntuaciones mejores en el pilar económico para el reactor BWRX-300 y puntuaciones mejores para el reactor VOYGR-6 en el pilar social, siendo el reactor SMART el reactor con puntuaciones menores en comparación con los otros dos reactores. El mapeo resulta similar al que se realizó entre el pilar económico y el pilar ambiental.

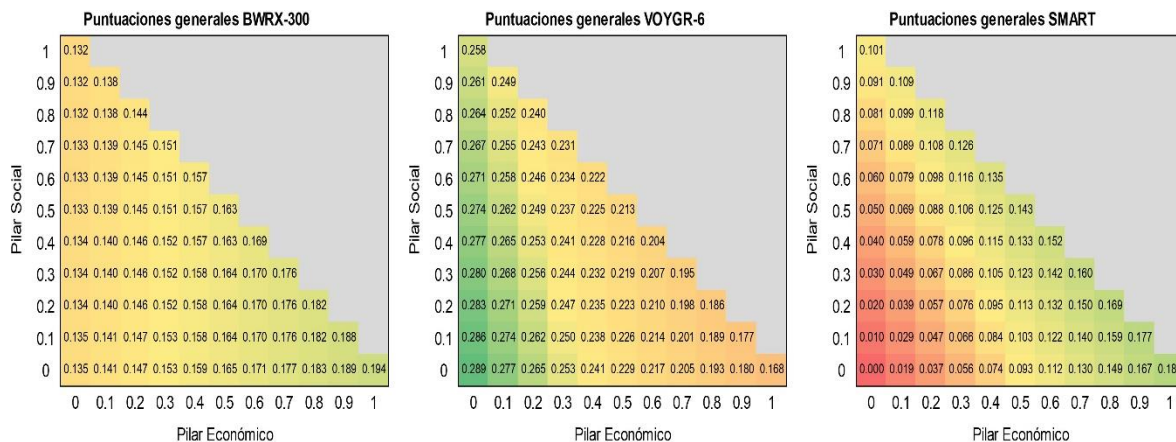


Figura 40. Mapeo de calor de las puntuaciones generales pilar económico vs pilar social.

Al igual que en el mapeo del pilar económico y el pilar ambiental, en la Figura 41, se presenta el resultado del análisis, en donde se puede observar que el reactor BWRX-300 es el mejor puntuado en el pilar económico siendo el pilar social el menos favorable, mientras que el reactor SMART no tiene presencia en el mapeo final pues los valores de las puntuaciones son inferiores en comparación con los otros reactores. De igual manera es notable la presencia del reactor VOYGR-6 pues se ubica en la mayor parte del mapeo, con un buen balance entre el pilar económico y el pilar social.

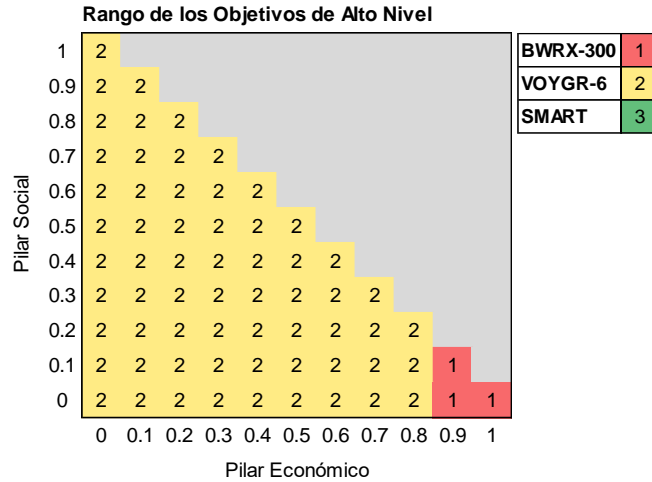


Figura 41. Mapeo pilar económico vs pilar social.

En la Figura 42 se muestra el mapeo para el pilar ambiental y el pilar social, en donde los resultados arrojan puntuaciones mejores en el pilar social para el reactor VOYGR y puntuaciones menores para el reactor BWRX-300 tanto en el pilar social como en el pilar ambiental. Siendo el reactor SMART el reactor con puntuaciones menores en comparación con los otros dos reactores.

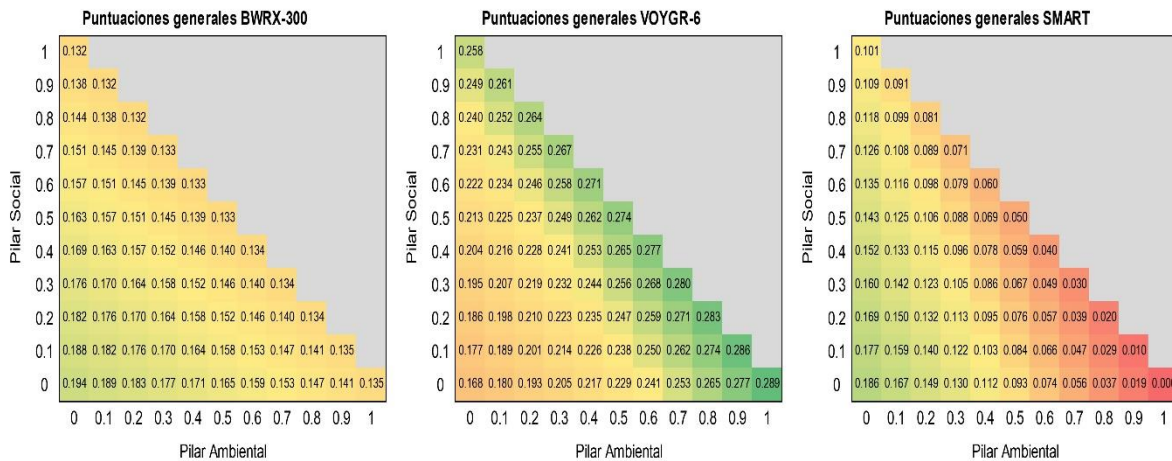


Figura 42. Mapeo de calor de las puntuaciones generales pilar ambiental vs pilar social.

El mapeo del pilar ambiental y el pilar social se muestra en la Figura 43, resultado del análisis se puede observar que el reactor BWRX-300 tiene el puntaje más bajo en ambos pilares, mientras que el reactor SMART no tiene valores representativos en el mapeo final pues los valores de las puntuaciones son inferiores en comparación con los otros reactores. De igual manera es notable la presencia del reactor VOYGR-6 pues se ubica en la mayor parte del mapeo, con un buen balance entre el pilar ambiental y el pilar social.

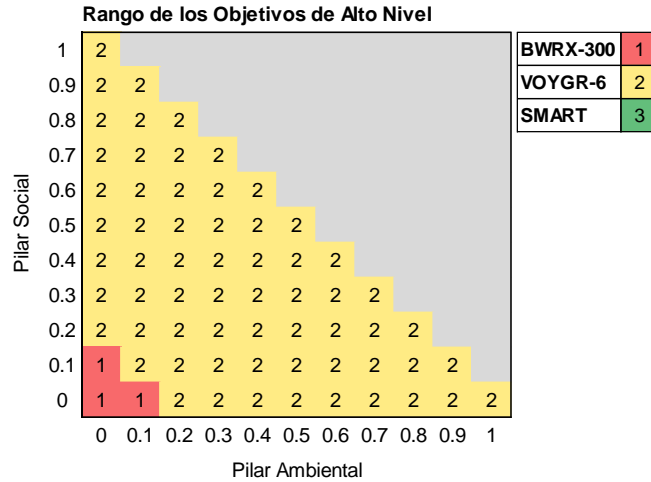


Figura 43. Mapeo pilar ambiental vs pilar social.

Del análisis realizado resulta que el reactor SMART es el menos puntuado al no tener presencia dentro del mapeo de los objetivos de alto nivel. Se puede observar que el reactor BWRX-300 tiene buena presencia en el pilar económico, sin embargo, en los pilares ambiental y social resulta con puntuaciones bajas. Respecto al reactor VOYGR-6 es el que mejor balance tiene en los tres pilares, siendo el mejor puntuado para el análisis y por consiguiente el mejor reactor a considerar en una futura planeación para incrementar la generación eléctrica mediante tecnología nuclear.

Estas conclusiones son altamente dependientes de los datos utilizados los cuales provienen de información pública que está actualizándose continuamente conforme el desarrollo de los reactores en consideración al nivel de maduración de las tecnologías.

Capítulo 5. Conclusiones

La planeación de la generación eléctrica de un país es de vital importancia para lograr un sistema eléctrico sostenible con una diversificación de la matriz de generación que pueda contribuir a la transición energética del país. El estudio realizado resulta importante para profundizar en el ámbito de la planeación energética tomando en cuenta a la energía nuclear como aliada en la diversificación de la matriz energética.

El análisis realizado permite aplicar los conocimientos obtenidos durante la maestría en la búsqueda de una metodología enfocada a evaluar nuevas tecnologías relacionando temas energéticos desde el foco técnico, social y económico. Es así como las nuevas tecnologías pueden compararse para identificar los beneficios que otorgan al sistema eléctrico de un país en una planeación energética que considere aspectos sociales, económicos y políticos.

Los SMRs se presentan como una tecnología en desarrollo con múltiples beneficios económicos y con diversas mejoras en la seguridad propia del reactor, siendo una opción importante que considerar en la planeación futura del sector eléctrico del país y del mundo. Agregando un punto importante a la experiencia nuclear que México tiene derivado de la operación de la CNLV.

De los resultados que se obtienen de este caso de estudio, la configuración VOYGR-6 de NuScale termina como el reactor mejor puntuado debido a sus características en las áreas ambientales y sociales que resultan de su avance tecnológico, el área de terreno necesaria para su instalación y sus características de seguridad.

Resulta importante tener en consideración que el reactor BWRX-300, con una sola unidad de generación de 300 [MWe], otorga beneficios económicos importantes en la planeación energética, principalmente en los costos de generación eléctrica, los empleos generados y el corto tiempo de construcción.

Con la meta establecida para instalar un reactor con la mínima capacidad de generación, el reactor SMART sería el reactor que cumpla con la meta. Sin embargo, resulta como el reactor con la puntuación global más baja debido principalmente a ser el reactor con el mayor uso de suelo, así como el reactor con mayor flujo nominal de agua de enfriamiento y el reactor que se proyecta con más años para su primera construcción, sin embargo, es el reactor que más empleos genera tanto para construcción como para operación y mantenimiento. Esto da origen a una posibilidad, para trabajos futuros, de realizar un análisis comparativo entre diversos tipos de configuraciones de SMR, pudiendo igualar la potencia requerida con varias unidades de generación o comparar la misma cantidad de unidades de generación con diferente capacidad instalada.

Derivado de la sección 2.3 del capítulo 2, en cuanto a los escenarios posibles de capacidad instalada, se recomienda implementar los escenarios del PAMRNT 2022-2036 pues se obtiene un índice de diversificación superior a las versiones anteriores, específicamente el escenario dos se considera como un escenario intermedio donde se puede lograr la instalación de la capacidad instalada proyectada a 2050, la cual asciende a 255,614 [MW]. De igual manera, en el mismo escenario, se proyectan cerca de 9,969 [MW] en capacidad instalada para generación eléctrica mediante tecnología nuclear al año 2050, siendo cerca del 4% de la capacidad instalada total de dicho escenario y la cual puede cubrirse de manera parcial e incluso total con la instalación de SMRs distribuidos en el territorio nacional.

Es necesario considerar para la instalación de SMRs regiones del país con preferencias de sismicidad baja, regiones importadoras de energía, conexiones a la red robustas, disponibilidad de agua y regiones en las cuales la infraestructura pueda crearse con cada proyecto para beneficiar el desarrollo de cada región.

Con el estudio realizado resalta la importancia del enfoque de los ODS en la planeación energética, pues los indicadores de rendimiento utilizados tienen vital relación con los ODS que tienen participación en la transición a energías limpias del sector eléctrico, contribuyen en los ODS relacionados con el crecimiento económico y el bienestar social. El enfoque orientado a los ODS nos otorga una relación entre los aspectos técnicos de una tecnología y los beneficios que se otorgan en los diferentes ODS.

Por último, la metodología KIND-ET resulta ser una herramienta con gran utilidad para la evaluación comparativa de sistemas tanto nucleares como no nucleares, siempre que los indicadores de rendimiento sean comparables entre los distintos tipos de sistemas a comparar, siendo recomendable su uso en proyectos que impliquen evaluaciones técnicas de diversas tecnologías e incluso escenarios de transición energética.

REFERENCIAS

1. Secretaría de Energía (SENER), “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037 (PRODESEN 2023-2037)”. Ciudad de México, (2023).
2. U.S. Department of State. <https://www.state.gov/translations/spanish/entra-en-vigor-acuerdo-de-cooperacion-nuclear-civil-entre-ee-uu-y-mexico/>
3. Objetivos de Desarrollo Sostenible, OIEA. <https://www.iaea.org/es/el-oiea/objetivos-de-desarrollo-sostenible-ods>
4. Sitio de internet Power Reactor Information System, OIEA. <https://pris.iaea.org/pris/Home.aspx>
5. Sitio de internet World Emissions Clock, <https://worldemissions.io/>
6. Schneider Mycle, The World Nuclear Industry Status Report 2022, Paris, Octubre 2022.
7. U.S. Department of State, Declaration to triple nuclear energy. <https://www.state.gov/declaration-to-triple-nuclear-energy/>
8. Our World in Data, “Nuclear Energy”, <https://ourworldindata.org/nuclear-energy#how-many-people-has-nuclear-energy-saved>
9. Office of Nuclear Energy, “How Much Power Does a Nuclear Reactor Produce?”, <https://www.energy.gov/ne/articles/infographic-how-much-power-does-nuclear-reactor-produce>
10. Naciones Unidas, [Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo: Nuestro Futuro Común](#), "Informe Brundtland", 1987.
11. “La tecnología nuclear al servicio de los Objetivos de Desarrollo Sostenible”, Organismo Internacional de Energía Atómica, https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull/bull573_sept2016_0.pdf, (2016).
12. Secretaría de Energía (SENER), “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037 (PRODESEN 2023-2037)”. Ciudad de México, (2023).
13. Sarquís Ramírez David, Apuntes para la historia de la ciencia y tecnología nuclear en México. Multidisciplina, núm 15. Mayo 2023.
14. Sitio de internet CFE: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2227>
15. Stephen M. Goldberg and Robert Rosner, “Nuclear Reactors: Generation to Generation”, American Academy of Arts & Sciences, 2011.
16. IAEA Advanced Reactors Information System, “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments”, (2022).
17. GE Hitachi, BWRX-300 General Description, Revision E, August 2023.
18. Sitio de internet GE-Hitachi, <https://nuclear.gepower.com/bwrx-300>
19. Sitio de internet Fermi Energy, <https://fermi.ee/en/bwrx-300/>
20. Sitio de internet NuScale, <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants>
21. “Status Report-NuScale SMR”, https://aris.iaea.org/PDF/NuScale-NPM200_2020.pdf , (2020)
22. “Status Report 77-System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART)”, <https://aris.iaea.org/PDF/SMART.pdf>, (2011)
23. Sitio de internet KAERI, <https://www.kaeri.re.kr/eng/>
24. IAEA Nuclear Energy Series, “Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy Systems Options: Final Report of the Collaborative Project KIND”, Viena, 2019.

25. V. Kuznetsov, G. Fesenko, A. Andrianov, I. Kuptsov, "INPRO Activities on Development of Advanced Tools to Support Judgment Aggregation for Comparative Evaluation of Nuclear Energy Systems", 2015.
26. "Nuclear's contribution to achieving the UN Sustainable Development Goals", World Nuclear Association, <https://world-nuclear.org/getmedia/87cb4c06-9bbd-4c95-a1e4-a2d653b7a3ba/Nuclears-contribution-to-achieving-the-UN-Sustainable-Development-Goals.pdf.aspx>, (2021).
27. "Status Report-BWRX-300", https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300_2020.pdf, (2019)
28. Mark R. Weimar, Ali Zbib, Don Todd, Techno-economic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington (2021).
29. "Feasibility of Small Modular Reactor", SaskPower, Ontario, Canada (2021)
30. "NuScale SMR Technology: An ideal solution for repurposing U.S. coal plant infrastructure and revitalizing communities", NuScale, (2021)
31. "Status Report 77-System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART)", <https://aris.iaea.org/PDF/SMART.pdf>, (2011)
32. "SMART. The Earliest Deployable Integral Reactor in the World", <https://www.kaeri.re.kr/>, (2023)
33. Kyu-dong Han, Myung-sub Roh, Economic Assessment of SMART Deployment in Korea using DEEP 5.1, Gyeongio, Korea 2015.
34. IAEA, Users Instructions for Extensions of KIND-ET. The INPRO/IAEA project on Comparative Evaluation of Nuclear Energy Systems Options, Viena 2019.