



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA
ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

ESCENARIOS DE PLANEACIÓN A LARGO PLAZO DE LA INTRODUCCIÓN DE UN PROGRAMA DE REACTORES
NUCLEARES RÁPIDOS EN EL SECTOR ELÉCTRICO MEXICANO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

M.I. EMILIO JAVIER YAÑEZ RUIZ LABRANDERA

TUTOR PRINCIPAL

DR. JUAN LUIS FRANÇOIS LACOUTURE
FACULTAD DE INGENIERÍA - UNAM

COMITÉ TUTOR

DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA - UNAM
DR. ALEJANDRO NÚÑEZ CARRERA, COMISIÓN NACIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR Y SALVAGUARDIAS
DR. FEDERICO PUENTE ESPEL – SEABORG TECHNOLOGIES

CIUDAD DE MÉXICO, CDMX, JUNIO DE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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: Dra. Martín del Campo Márquez Cecilia

Secretario: Dra. Nelson Edelstein Pamela Fran

1er. Vocal: Dr. François Lacouture Juan Luis

2do. Vocal: Dr. Puente Espel Federico

3er. Vocal: Dr. Núñez Carrera Alejandro

Lugar donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA - UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. JUAN LUIS FRANÇOIS LACOUTURE



FIRMA

Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por brindarme la oportunidad de formar parte de ella.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado.

A la Dra. Cecilia Martín del Campo y el Dr. Juan Luis François Lacouture por el apoyo incondicional brindado, por su vasto dominio en el área nuclear, y su magistral tutoría en esta investigación.

A los doctores Alejandro Núñez Carrera y Federico Puente Espel por el seguimiento dado en todo el período.

A la Dra. Pamela Fran Nelson Edelstein por su apoyo como sinodal del jurado.

Al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por la oportunidad de participar en el proyecto MPRO y permitir el uso de sus herramientas.

A mis amigos cubanos y mexicanos.

Dedicado a:

A mi familia, en especial a mi madre.

RESUMEN

México, como miembro del proyecto INPRO (*International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), ha expresado interés en el proyecto de colaboración FAST FORWARD, que se centra en el desarrollo de ciclos de combustible de plutonio reciclado para la generación de energía nuclear con reactores rápidos en sinergia con los actuales reactores térmicos. El proyecto INPRO tiene como objetivo ayudar a los países a desarrollar un enfoque sostenible para la energía nuclear y la planificación a largo plazo de la infraestructura nuclear. El proyecto se centra en la innovación en la tecnología de reactores nucleares y en los ciclos de combustible, así como en la evaluación de la sostenibilidad y la seguridad de la energía nuclear. En este sentido, la presente investigación propuso la posibilidad de incorporar reactores rápidos en las capacidades nucleares mexicanas y hacer una proyección hacia el futuro. La incorporación de reactores rápidos en las capacidades nucleares de México y la proyección hacia el futuro son una iniciativa interesante dado que los reactores rápidos tienen la capacidad de utilizar combustibles nucleares más eficientemente que los reactores térmicos convencionales. Además, los reactores rápidos pueden utilizar combustibles reciclados, lo que ayuda a reducir la cantidad de residuos nucleares. En el presente trabajo se aplicó una metodología completa de evaluación de escenarios energéticos, haciendo uso de diversas herramientas de análisis desarrolladas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), para hacer la recopilación completa de todas las variables asociadas al *FRONT-END* y *BACK-END* del ciclo de combustible nuclear y costos asociados, y de esta forma declarar indicadores claves en la evolución y posterior toma de decisión para las mejores alternativas de expansión nuclear. El análisis de los diferentes escenarios nucleares ha permitido identificar que los reactores rápidos con reciclado de plutonio son una opción más eficiente y sostenible a largo plazo. Los resultados obtenidos mostraron que estos escenarios tienen un mejor uso de los recursos naturales. Otro aspecto importante evaluado en el análisis es la reducción de la cantidad de desechos radiactivos producidos, ya que el reciclado de plutonio permite reducir el volumen y la toxicidad de los residuos nucleares. Además, los reactores rápidos con reciclado de plutonio permiten la utilización de combustibles reciclados de otros reactores nucleares, lo que implica una reducción en la cantidad

de residuos nucleares almacenados. La evaluación de estos escenarios ha sido posible gracias a la utilización de herramientas de simulación y análisis que permitieron la realización de un análisis completo de diferentes variables y factores que influyen en la generación de energía nuclear. Estas herramientas permiten la identificación de los escenarios más eficientes y sostenibles desde un punto de vista técnico y económico, lo que se traduce en beneficios a largo plazo para el sector energético y para la sociedad en general.

Abstract

Mexico, as a member of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) of the International Atomic Energy Agency (IAEA), has expressed interest in the FAST FORWARD collaboration project, which focuses on the development of recycled plutonium fuel cycles for nuclear energy generation with fast reactors in synergy with current thermal reactors. The INPRO project aims to help countries develop a sustainable approach to nuclear energy and long-term nuclear infrastructure planning. The project focuses on innovation in nuclear reactor technology and fuel cycles, as well as the evaluation of the sustainability and safety of nuclear energy. In this sense, the present investigation proposed the possibility of incorporating fast reactors into Mexican nuclear capacities and making a projection towards the future. The incorporation of fast reactors into Mexico's nuclear capacities and projection towards the future is an interesting initiative given that fast reactors have the ability to use nuclear fuels more efficiently than conventional thermal reactors. In addition, fast reactors can use recycled fuels, which helps to reduce the amount of nuclear waste. In the present work, a complete methodology for evaluating energy scenarios was applied, using various analysis tools developed by the IAEA, to make a complete collection of all the variables associated with the front-end and back-end of the nuclear fuel cycle and associated costs and thus declare key indicators in the evolution and subsequent decision-making for the best alternatives for nuclear expansion. The analysis of different nuclear scenarios has allowed identifying that fast reactors with plutonium recycling are a more efficient and sustainable long-term option. The results showed that these scenarios have a better use of natural resources. Another important aspect evaluated in the analysis is the reduction of the amount of radioactive waste produced, as plutonium recycling allows reducing the volume and toxicity of nuclear waste. In addition, fast reactors with plutonium recycling allow the use of recycled fuel from other nuclear reactors, which implies a reduction in the amount of nuclear waste stored. The evaluation of these scenarios has been possible thanks to the use of simulation and analysis tools that allowed the complete analysis of different variables and factors that influence nuclear energy generation. These tools allow the identification of the most efficient and sustainable scenarios from a technical and economic point of view, resulting in long-term benefits for the energy sector and the society in general.

Índice

<i>Agradecimientos</i>	3
<i>Dedicado a:</i>	4
RESUMEN.....	5
Abstract	7
Índice de figuras	11
Índice de Tablas	13
Introducción	14
<i>Novedad y actualidad del tema</i>	16
Objetivo general.....	17
Objetivos específicos.....	17
Capítulo 1. PLANEACION ENERGETICA Y GENERACION EN MEXICO	18
1.1. FUENTES DE GENERACION ENERGETICA EN MEXICO.....	18
1.2. ESTADO ACTUAL DE LAS FUENTES NUCLEARES.....	21
1.3. CICLO DE COMBUSTIBLE DE LA CENTRAL NUCLEAR DE LAGUNA VERDE	21
1.4. PROYECCION Y PLANEACION DE LA ENERGIA NUCLEAR	22
1.5 PROYECCION NUCLEAR DE MEXICO A LARGO PLAZO.....	25
Capítulo 2. CICLOS DE COMBUSTIBLE.....	26
2.1. DEFINICION DE CICLOS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR.....	26
2.2. PROYECTOS E INVESTIGACIONES ENFOCADOS EN CICLOS MAS EFICIENTES.....	34
Capítulo 3. CODIGOS Y MODELOS PARA LA PLANEACION DE LA ENERGIA NUCELAR.....	36

3.1. SISTEMAS DE SIMULACION DE CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR (NFCSS)	36
3.2. MESSAGE.	39
3.3. HERRAMIENTAS Y METODOLOGIAS EMPLEADAS CON BASE EN EL OIEA	43
3.3.1. KIND.ET EVALUATION TOOLS.....	43
3.3.1.1. Teoría del valor de múltiples atributos (MAVT)	45
3.3.2. KIND ET EVALUATION TOOSL EXTENSIONES	46
3.3.2.1. RANKS MAPPING TOOLS	46
3.3.2.2 Overall Score Spread Builder - Score Evaluator.....	47
3.3.2.3 Domination Identifier.....	47
3.4. Antecedentes en la aplicación de la metodología de INPRO.	48
Capítulo 4. CREACIÓN DE LAS DOS ETAPAS DE ESCENARIOS CONFIGURADOS.....	49
4.1 DESCRIPCION DE LOS ESCENARIOS Y FLUJO DE LA METODOLOGIA APLICADA EN ETAPA A.....	49
4.1.1 PLANTEAMIENTO CON ENFOQUE KIND-ET.....	52
4.1.2 RESUMEN DE ASPECTOS TECNICOS DE REACTORES Y COMBUSTIBLE	54
4.1.3 VALORACION DE INDICADORES CLAVE	59
4.1.4 FACTORES DE PESO PARA OBJETIVOS, ÁREAS E INDICADORES	60
4.2 ESTRUCTURA DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS EN NFCSS	61
4.2.1. DESCRIPCION DE LOS TRECE ESCENARIOS PARA CADA TECNOLOGIA NUCLEAR.	63
4.3. ESTRUCTURACION DE ESCENARIOS EN MESSAGE ETAPA B	64
Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSION.	68
5.1. ETAPA A.....	68
5.1.1 Etapa A	68
5.1.2 Single-attribute value functions vs indicator y Single-attribute value functions.....	74
5.1.3 High-level objectives scores for the base weights y areas scores for the base weights.....	76
.....	76
5.1.4 Ranking results for weights sensitivity.....	78
5.1.4 Resultados para la sensibilidad de la función de valor	80
5.1.5 Domination identifier results	82
5.1.6 Overall Score Spread Builder	83
5.1.7 Ranks mapping tool	85
5.2. ETAPA B.....	88
FRONT END Y BACK END DE LOS ESCENARIOS	88
5.2.1 DEMANDA Y CAPACIDAD PROYECTADA.	89
5.2.2 RECURSOS NATURALES CONSUMIDOS	90

5.2.3 PLUTONIO PROCESADO EMPLEADO ANUALMENTE	91
5.2.4 COMPARATIVA DE DESECHOS NUCLEARES ACUMULADOS.	92
5.2.5 SENSIBILIDAD DE LOS CICLOS DE COMBUSTIBLE, CONSIDERANDO REPROCESADO DE COMBUSTIBLE.....	93
5.2.6 ACUMULADO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR GASTADO	94
CONCLUSIONES.....	96
Referencias	97

Índice de figuras

FIG. 1. Adición de capacidades al 2032 [5]	20
FIG. 2. Retiro de capacidades al 2032 [5]	20
FIG. 3. Incremento de la energía nuclear al 2032.....	25
FIG. 4. Ciclos de combustible nuclear abierto y cerrado [6].....	28
FIG. 5. Diagrama de ciclo de combustible cerrado para FR_MOX [7].....	32
FIG. 6. Flujo de datos NFCSS [10].....	38
FIG. 7. Módulos del Message [7]	41
FIG. 8. Ciclo del combustible nuclear [7]	42
FIG. 9. Metodología general aplicada.....	52
FIG. 10. Árbol de objetivos	53
FIG. 11. Flujo de materiales para ABWR al 2100.	¡Error! Marcador no definido.
FIG. 12. Flujo de materiales para AP-1000 al 2100 con 100% de reprocesado de combustible gastado.....	¡Error!
Marcador no definido.	
FIG. 13. Flujo de materiales para AP1000 al 2100.....	¡Error! Marcador no definido.
FIG. 14. Flujo de materiales para EFR al 2100	¡Error! Marcador no definido.
FIG. 15. cadena de procesos en message	64
FIG. 16. recursos naturales declarados en message.....	65
FIG. 17. front-end en message	66
FIG. 18. back-end en message	67
FIG. 19. FORMA SECUNADARIA RESULTANTE	67
FIG. 20. CAPACIDAD INSTALADA TOTAL EN NES-1 a NES-6	68
FIG. 21. GENERACIÓN ANUAL TOTAL EN NES-1 A NES-6.....	69
FIG. 22. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 1.....	69
FIG. 23. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 2.....	70
FIG. 24. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 3.....	70
FIG. 25. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 4.....	70
FIG. 26. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 5.....	71
FIG. 27. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 6.....	71
FIG. 28. Diagrama de flujo de materiales para NES-1 Y NES-2	72
FIG. 29. DIAGRAMA DE FLUJO DE MATERIALES PARA NES-3 Y NES-4.....	73
FIG. 30. DIAGRAMA DE FLUJO DE MATERIALES PARA NES-5 Y NES-6.....	73
FIG. 31. SINGLE-ATTRIBUTE VALUE FUNCTIONS VS INDICATOR.....	75
FIG. 32. SINGLE-ATTRIBUTE VALUE FUNCTIONS.....	75
FIG. 33. Clasificación de resultados para los pesos base.....	76
FIG. 34. Puntuaciones de objetivos de alto nivel para las ponderaciones base	77
FIG. 35. puntajes de las áreas para los pesos base	78
FIG. 36. Ponderaciones de objetivos de alto nivel.....	79
FIG. 37. Clasificación de resultados para la sensibilidad de los pesos.....	80
FIG. 38. Clasificación de resultados para la sensibilidad de la función de valor.....	82
FIG. 39. FIG. 3.57. Domination identifier results.	82
FIG. 40. DOMINATING OPTIONS TABLE	83
FIG. 41. Overall Score Spread Builder.	85
FIG. 42. Opciones de NES con el primer rango.....	86
FIG. 43. Puntuaciones generales máximas para todas las opciones de NES.	87

FIG. 44. Capacidad instalada total	89
FIG. 45. Energía total generada	90
FIG. 46. Consumo anual de uranio natural	91
FIG. 47. Plutonio procesado empleado anualmente	91
FIG. 48. Uranio empobrecido acumulado.....	92
FIG. 49. Uranio empobrecido empleado en MOX	94
FIG. 50. Acumulado de combustible nuclear gastado.	95

Índice de Tablas

Tabla 1. TABLA DE RENDIMIENTO	54
Tabla 2. Parámetros del reactor.	55
Tabla 3. PARAMETROS DEL COMBUSTIBLE.....	56
Tabla 4. VALORES GLOBALES DE ENTRADA EN NFCSS.....	57
Tabla 5. parámetros económicos utilizados en message	58
Tabla 6. costos asociados al combustible utilizados en message.....	59
Tabla 7. valuación de indicadores clave	60
Tabla 8. pesos asignados a los objetivos, áreas e indicadores	61
Tabla 9. Resumen de las tecnologías planteadas por separado en NFCSS.	62
Tabla 10. Valores generales de operación en nfcss.....	63
Tabla 11. PARÁMETROS DE COMBUSTIBLE UTILIZADOS EN NFCSS.....	63
Tabla 12. SENSIBILIDAD DE LA FUNCIÓN VALOR EN INDICADOR “KI-7 LUAC+LUOM”	81
Tabla 13. DISTRIBUCIONES PROBABILÍSTICAS.	84

Introducción

Controvertida y extraordinaria son dos adjetivos que han acompañado a la generación de la energía nuclear al largo de los años de su desarrollo a nivel mundial. El escenario global post-2020 en aspectos económicos, energéticos y geopolíticos demuestra contundentemente la necesidad de contemplar en el portafolio energético de las naciones a la energía nuclear y todos sus beneficios derivados, marcando una pauta definitiva sobre su soberanía. El continente europeo, histórico generador de energía nuclear, ha sido fiel testigo de las consecuencias de depender de fuentes de energías alternativas, como el gas natural y el petróleo, recursos de los que carece en su mayoría. Unido a lo anterior y dada las características de bajas emisiones de gases de efecto invernadero considerando el ciclo de vida de la tecnología, su fiabilidad en el suministro de carga base limpia para la red eléctrica y su competitividad, la generación nuclear es aspecto de máxima prioridad en la seguridad energética de la nación, a largo plazo. México, como miembro activo del proyecto INPRO (*International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*) [1] del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), ha expresado interés en el proyecto de colaboración FAST FORWARD [2], que se centra en el desarrollo de ciclos de combustible de plutonio reciclado para la generación de energía nuclear con reactores rápidos en sinergia con los actuales reactores térmicos. En este sentido, se propone la posibilidad de incorporar reactores rápidos en las capacidades nucleares mexicanas y hacer una proyección hacia el futuro. Al cierre de 2020, la capacidad total instalada en La red eléctrica mexicana fue 83,121MWe, mientras que al 30 de abril de 2021 se incrementó hasta 89,479 MW, considerando las unidades de Central Eléctrica en operación y en pruebas, lo cual refleja un incremento de 7.65% con respecto al 2020. Este incremento se debe principalmente a adiciones y Centrales Eléctricas en

periodo de pruebas, como ciclos combinados (3,113 MW), eólicas (1,187 MW) y fotovoltaicas (1,876 MW) [3]

Este aumento se debe principalmente a incorporaciones de ciclos combinados de gas, plantas de energía eólica y fotovoltaica. De la capacidad total, sólo 1608 MWe es la contribución de la energía nuclear. La producción total anual de electricidad durante 2021 fue de 312 347 GWe-hr con 86 988 GWe-hr de tecnologías de energía limpia [3]. Un escenario de pronóstico conservador considera una capacidad instalada de 250,000 MWe de energía limpia para 2050 y alrededor de 300,000 MWe para 2100.

México es un país firmante del Acuerdo de París y, por lo tanto, delineó y comunicó sus post- Acciones climáticas 2020 a través de su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés). Establece la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en un 30 % para 2020 y un 50 % para 2050 en comparación a niveles de 2000. En cuanto a los objetivos de energía limpia, la participación de las tecnologías limpias debe ser del 35 % para 2024, del 40 % para 2034, y 50% para 2050 [4]. Por tanto, es de interés en el ámbito nacional estudiar alternativas de expansión energética a través de tecnologías nucleares que ayuden a lograr objetivos de generación y reducción de emisiones; por lo que la planificación energética a largo plazo ha sido el principal objetivo del presente trabajo.

El Organismo Internacional de Energía Atómica ha sido desarrollador y diseminador de herramientas de análisis y evaluación de la energía nuclear, planificación de sistemas de energía nuclear (NES, por sus siglas en inglés), con el objetivo de lograr su desarrollo sostenible. La base de la presente investigación ha sido aplicar la metodología IAEA INPRO KIND-ET, para la comparación de diferentes tecnologías y escenarios energéticos a largo plazo, tomando en cuentas indicadores de importancia en todos los aspectos involucrados en la cadena de generación de energía nuclear.

Novedad y actualidad del tema

La planificación energética es cada vez más importante en un mundo que busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia un sistema energético más sostenible y eficiente. Las herramientas de planificación energética permiten evaluar diferentes escenarios y estrategias para alcanzar los objetivos energéticos y ambientales deseados. La creciente necesidad de abordar estos desafíos globales, y la transición a fuentes de energía renovable, han repercutido en el desarrollo de herramientas de planificación energética que permitan a los planificadores y responsables políticos tomar decisiones informadas y estratégicas, identificar las mejores opciones de inversión, y maximizar los beneficios económicos y ambientales a largo plazo. Además, con el avance tecnológico y la innovación, las herramientas de planificación energética se han vuelto más sofisticadas y precisas, permitiendo una evaluación más detallada y precisa de los escenarios energéticos futuros. En resumen, la novedad y actualidad del uso de herramientas de planificación energética radica en su capacidad para abordar los desafíos energéticos y ambientales globales y permitir una toma de decisiones estratégicas y eficaces en el campo de la energía.

A medida que un número creciente de países analiza la energía nuclear para satisfacer sus futuras necesidades energéticas, el OIEA está ampliando su apoyo para ayudar a sus Estados Miembros a optar por esta opción. El Organismo ayuda a garantizar que la energía nuclear se utilice de la manera más segura posible en la actualidad, en la medida de lo posible, y que se utilice en todo el mundo. Como parte de la estrategia llevada a cabo por el OIEA nació el proyecto INPRO, el cual ha incorporado equipos de trabajo de todo el mundo para juntar esfuerzos y encaminar la energía nuclear hacia el desarrollo sostenible. El tema de tesis desarrollado está enfocado en las tecnologías de reactores nucleares rápidos y ciclos de combustible avanzados (Uranio-Plutonio) para ser contemplados en la planeación energética de México a largo plazo (2050 y más allá), empleando la metodología desarrollada en INPRO.

Objetivo general

- ❖ Implementar una metodología completa de evaluación de escenarios energéticos nucleares, para lograr la evaluación de múltiples escenarios a largo plazo, aplicando para tal objetivo diferentes herramientas y metodologías desarrolladas por el OIEA.

Objetivos específicos

- Construir escenarios energéticos fusionando diferentes tecnologías de generación nuclear.
- Realizar una evaluación completa del FRONT-END y del BACK-END, asociado al ciclo de combustible nuclear de los escenarios.
- Detectar y evaluar índices involucrados en todo el proceso de generación de energía en cada escenario, con el fin de lograr una comparativa lo más adecuada posible entre todos los escenarios.
- Lograr combinaciones de escenarios de LWR, FR, LWR-MOX que representen una mejora sustancial de la administración de combustible nuclear.
- Aplicar la metodología de KIND-ET sobre cada propuesta de escenarios.
- Determinar, con base en la metodología y procedimientos aplicados a los escenarios propuestos, las mejores opciones evaluadas.

El contenido de la tesis está estructurado en cinco capítulos. En el capítulo 1 se aborda el tema de la planeación energética y la generación en México. El capítulo 2 plantea los ciclos de combustible nuclear, variables y ecuaciones que lo describen. En el capítulo 3 se presentan y describen las herramientas del OIEA empeladas en el trabajo. Por su parte el capítulo 4 resume la estructura de modelos, escenarios, aspectos técnicos y consideraciones aplicadas. A modo de resumen el capítulo 5 agrupa los principales resultados obtenidos, divididos en dos etapas.

Cabe hacer notar que muchas de las tablas y figuras están en el idioma inglés, ya que este es el idioma de las herramientas utilizadas y no se ha querido desvirtuar el significado preciso de la terminología utilizada.

Capítulo 1. PLANEACION ENERGETICA Y GENERACION EN MEXICO

1.1. FUENTES DE GENERACION ENERGETICA EN MEXICO

El panorama energético mundial se encuentra en constante evolución y cambio debido a la demanda creciente de energía en todo el mundo. Actualmente, los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) todavía son la fuente principal de energía utilizada a nivel mundial, aunque la proporción de energías renovables (como la energía solar, la eólica y la hidráulica) está en constante aumento.

Según las estadísticas de la Agencia Internacional de Energía (AIE), los combustibles fósiles representan aproximadamente el 80% del consumo mundial de energía, mientras que las energías renovables representaron el 20% [5]. Sin embargo, la capacidad de energías renovables instalada ha crecido rápidamente en los últimos años con la energía solar y la eólica liderando el crecimiento. Además, la transición energética hacia fuentes más limpias y renovables es una tendencia creciente en muchos países y regiones, impulsada por la preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Muchos gobiernos están implementando políticas y programas para promover el uso de energías renovables y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Por otro lado, también se están desarrollando nuevas tecnologías y soluciones para el almacenamiento de energía, lo que permite una mejor integración de las energías renovables en la red eléctrica y una mayor flexibilidad en la gestión de la oferta y la demanda de energía.

El mix energético de México está compuesto principalmente por petróleo, gas natural y carbón, los cuales representan alrededor del 80% de la generación de energía del país. El restante 20% se compone de fuentes renovables como hidroelectricidad, energía solar y eólica, geotermia y biomasa. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) es la principal empresa encargada de la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en México, y es responsable de la mayor parte de la producción de energía eléctrica en el país. En los últimos años, ha habido un esfuerzo por diversificar el mix energético y aumentar la participación de las energías renovables en la generación de electricidad en México.

Dentro de las medidas de políticas relacionadas con el Sector Eléctrico Nacional (SEN), destaca que debe observar el buen desarrollo de su sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica, así como promover la eficiencia y sustentabilidad energética mediante la diversificación de su parque de generación. Una vez consideradas las estimaciones de demanda, para la elaboración del escenario de expansión, se toman como base la localización de las adiciones de capacidad de generación y transmisión que requiere el SEN para atender los incrementos resultantes. En parte, estas necesidades quedarán cubiertas mediante obras actualmente en proceso de construcción o licitación. La demanda restante por cubrir se atenderá mediante nuevos proyectos de generación desarrollados por particulares o por la propia Comisión Federal de Electricidad (CFE), de conformidad con las leyes aplicables.

Es importante tomar en consideración dos aspectos fundamentales para la planificación del SEN: el tiempo estimado para la realización de los proyectos y la vida útil de los mismos. Esto se debe a la propia naturaleza del sector eléctrico, ya que los proyectos presentan largos periodos de maduración, por lo cual las decisiones de inversión en las obras de expansión se toman con varios años de anticipación. Desde la fecha de inicio del concurso para la construcción de una nueva central generadora hasta su entrada en operación comercial, transcurren aproximadamente de cuatro a siete años, mientras los proyectos de transmisión de tres a cinco años al periodo previo a la entrada en su operación. Adicionalmente, para llevar a cabo la formulación, evaluación y autorización de los proyectos, el tiempo mínimo requerido es de un año.

Resultados del proceso de planeación en México indican que se requieren **66,912 MW** de capacidad adicional para satisfacer la demanda de energía eléctrica en el periodo 2018-2032, lo que representa una inversión de 1.7 billones de pesos (7.8% del PIB en 2017) en los siguientes 15 años [6]. La capacidad adicional para la generación eléctrica se integrará en 45% por tecnologías convencionales y 55% por tecnologías limpias. En el grupo de las tecnologías convencionales, predominan los proyectos de ciclo combinado con 28,105 MW. La figura 1 muestra la contribución

de cada forma de generación de energía para suplir la demanda proyectada. La figura 2 se muestra el retiro de capacidades en el mismo periodo de tiempo.

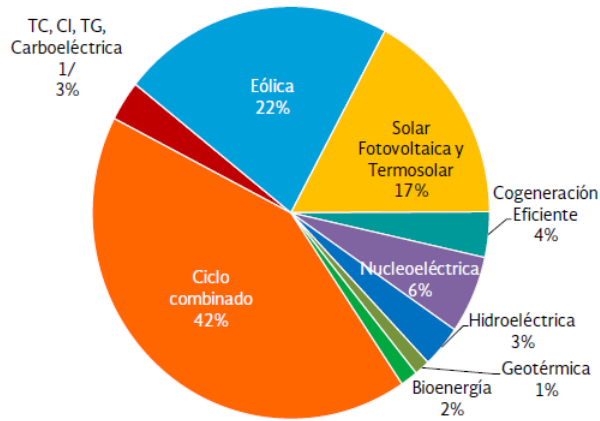
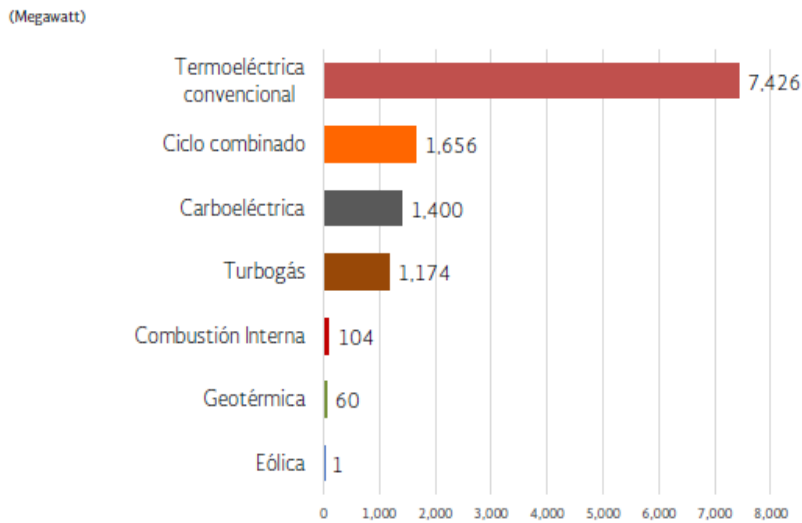


FIG. 1. ADICIÓN DE CAPACIDADES AL 2032 [6]



Fuente: Elaborado por la SENER con información del CENACE y la CFE.

FIG. 2. RETIRO DE CAPACIDADES AL 2032 [6]

1.2. ESTADO ACTUAL DE LAS FUENTES NUCLEARES

México cuenta con una central nucleoelectrónica ubicada en el estado de Veracruz, con una capacidad actual de 1552 MWe, cuya generación representa aproximadamente el 3% del total nacional (10.9 TWh) [7]. Equipada con dos reactores nucleares de agua en ebullición (BWR, por sus siglas en inglés). Dicha tecnología de reactores cuenta con un vasto historial a nivel nacional y mundial en la operación y generación de energía eléctrica.

1.3. CICLO DE COMBUSTIBLE DE LA CENTRAL NUCLEAR DE LAGUNA VERDE

La gestión del ciclo de combustible en los reactores nucleares difiere notablemente de las fuentes tradicionales de generación energética. Pasando por una serie de procesos que van desde la obtención del mineral del uranio, su procesamiento en diferentes etapas, obtención de uranio enriquecido, irradiación y procesos asociados a la post-irradiación.

Asociados a los procesos anteriores están involucrados la conversión del uranio a UF_6 , enriquecimiento, fabricación de combustible y manejo y almacenamiento del combustible nuclear gastado, cada uno de los cuales tiene un costo financiero relacionado que engloban el costo total del combustible nuclear y garantizan quemados estándares del combustible de aproximadamente 45 GWd/TMU (Gigawatt-día/tonelada métrica de uranio). El suministro del combustible nuclear de la central nuclear de Laguna Verde está garantizado por proveedores externos, donde en cada recarga de combustible del núcleo se provee de combustible fresco y posteriormente el combustible es almacenado a largo plazo, constituyendo de esta forma en lo que se conoce en la ingeniería nuclear como un CICLO ABIERTO de combustible (*ver sección 2.1*). El futuro de los ciclos de combustibles nucleares está encaminado a la optimización y mayor utilización de los recursos nucleares disponibles, por lo que la acumulación y almacenamiento de combustible gastado irradiado resulta cada vez más en una opción obsoleta. En tal sentido los países con mayores avances tecnológicos en el campo nuclear están presentando ciclos de combustible modernos y tecnologías de quemado profundo de combustible nuclear gastado, destacando las combinaciones de ciclos de combustible de reactores rápidos y reactores térmicos con resultados prometedores en la

sustentabilidad de la energía nuclear. Algunas de estas combinaciones entre ciclos de combustibles fueron estudiadas en la presente investigación, demostrando las mejoras sustanciales que traen consigo en la gestión de recursos nucleares. En todo los análisis de esta investigación se consideró el ciclo de combustible ya existente en la central Laguna Verde y las configuraciones bajo las cuales opera la central, profundizando en el uso de su combustible nuclear gastado y el posible uso y mejora en combinación con otras tecnologías y ciclos de combustible.

1.4. PROYECCION Y PLANEACION DE LA ENERGIA NUCLEAR

A nivel mundial la demanda de electricidad experimenta crecimientos acelerados en los tiempos actuales y las décadas siguientes, en estrecha relación al desarrollo industrial y tecnológico de la humanidad, además del envejecimiento de las capacidades instaladas, por lo que se necesitan agregar nuevas capacidades de generación de electricidad para reemplazar las unidades antiguas y en proceso de retirada. Las opciones disponibles para satisfacer la demanda de electricidad deben tener en cuenta factores como la seguridad energética, la diversidad de fuentes de energía para la generación de electricidad, la protección del medio ambiente y la sustentabilidad. La estabilidad a largo plazo de los precios de los combustibles también es otro factor clave, ya que los precios de los combustibles fósiles representan un alto porcentaje del costo de la electricidad producida, mientras que el costo de la energía nuclear es menos sensible a las variaciones de los precios del combustible nuclear. La energía nuclear debe verse en el contexto de los factores antes mencionados. Si se necesita con urgencia capacidad adicional de generación de electricidad, las centrales eléctricas alimentadas con gas, petróleo o carbón pueden planificarse y construirse más rápidamente que las centrales nucleares. Debido al hecho de que la planificación y ejecución de un proyecto de energía nuclear requieren plazos de entrega más largos y también plantea demandas especiales en las infraestructuras relacionadas. Este enfoque de adición rápida de centrales eléctricas de combustibles fósiles para necesidades urgentes es posible siempre que en el país estén disponibles recursos energéticos de estos combustibles o se tenga fácil acceso a ellos. Sin embargo, este enfoque no puede

ser una solución continua y a largo plazo a partir de las consideraciones ambientales de las emisiones de CO₂ de las centrales eléctricas de combustibles fósiles. La energía nuclear se considera una opción segura y estable para la generación de electricidad si se tienen en cuenta sus características especiales y se pueden cumplir los requisitos que plantea, especialmente para el mantenimiento de un alto nivel de seguridad.

Las características específicas para tener en cuenta en la planificación de un programa nucleoelectrico son:

Las centrales nucleares prácticamente no generan CO₂ y, aunque se considere todo el ciclo del combustible nuclear, las cantidades son muy pequeñas por unidad de energía eléctrica producida. Por lo tanto, la energía nuclear podría jugar un papel global importante cuando se considera el tema del cambio climático.

La energía nucleoelectrica puede ayudar a lograr la seguridad energética mediante la independencia de las importaciones de energía, ya que es relativamente fácil y económico almacenar la cantidad de combustible nuclear necesaria para varios años de funcionamiento de la central nuclear.

Proporciona diversidad de recursos energéticos para la generación de electricidad y es una opción válida a largo plazo. La independencia de las importaciones de energía se obtiene mediante la inversión en tecnología avanzada. Esto, a su vez, podría resultar en la introducción de otras tecnologías avanzadas también.

Las centrales nucleares requieren una inversión de capital relativamente mayor en comparación con las plantas de combustibles fósiles. En las primeras etapas de un programa de energía nuclear habrá inversiones y costos adicionales para establecer las organizaciones necesarias; no obstante, las centrales nucleares pueden contribuir a mantener la estabilidad a largo plazo de los precios de generación de electricidad. Se requieren leyes y normas especiales para la protección radiológica y la seguridad nuclear. Una central nuclear es técnicamente muy exigente en la calidad del diseño, construcción y operación; en consecuencia, podría necesitarse asistencia del extranjero en forma de acuerdo/contrato a largo plazo después del inicio de un programa nucleoelectrico. Una de las decisiones importantes se referirá a la cuestión de hasta qué punto un país debe tratar de ser independiente y cómo se debe organizar el apoyo externo. Esto dependerá de la infraestructura

industrial del país. Existe un pequeño riesgo de accidentes que podrían tener grandes consecuencias.

Los desechos radiactivos de las centrales nucleares deben gestionarse de manera segura y, en última instancia, eliminarse de manera segura una vez que la tecnología esté disponible y se mejore continuamente. Un enfoque global podría contribuir a converger en una solución. Para el éxito de un programa de energía nucleoelectrónica, es de suma importancia contar con un claro compromiso gubernamental/nacional antes de su lanzamiento. Con respecto a la necesidad de la energía nuclear como componente de la combinación energética general, debe tenerse en cuenta que la construcción de una sola unidad de una central nuclear a menudo no es rentable en vista del alto costo anticipado (inversión inicial en la preparación del programa y del primer proyecto) implicados en el mismo. Por lo tanto, el país en desarrollo que lo desee debería aspirar a un programa de energía nuclear y no a un proyecto aislado de energía nuclear.

Los siguientes criterios son fundamentales y de manera general en el proceso de planificación de programas nucleares de un país. Las decisiones se basarán en: La factibilidad técnica y la viabilidad económica de la energía nuclear como una estrategia de expansión del suministro de energía a largo plazo, considerando todas las alternativas y factores relevantes; planificación integral, que cubra todos los aspectos y tome las medidas adecuadas para cumplir con toda la infraestructura de apoyo necesaria con financiamiento asegurado; tomar las medidas adecuadas para una gestión eficaz del proyecto, con el objetivo de completar a tiempo el primer proyecto de energía nuclear dentro del costo estimado y operarlo de manera segura y confiable una vez que esté en servicio.

Cabe mencionar que, de los puntos mencionados anteriormente, nuestro trabajo se enfoca en el punto número uno (factibilidad técnica y la viabilidad económica de la energía nuclear como una estrategia de expansión del suministro de energía a largo plazo), centrándonos en todo el ciclo de combustible nuclear, los procesos relacionados al mismo, aspectos económicos y combinaciones óptimas de tecnologías nucleares.

1.5 PROYECCION NUCLEAR DE MEXICO A LARGO PLAZO

En proyecciones de expansión del sistema energético nacional de años anteriores (2018) [8] estuvo contemplado la adición de capacidad de energía nuclear por 4,080.0 MW entre 2029 y 2031, lo que representa un incremento de más del 260% con respecto a los valores de 2017, pasando de 1,400.0 MW a 5,480.0 MW. En la figura 3 se observa el incremento en capacidades, proyectado por tipo de tecnología hasta el año 2032, donde la introducción de nuevas capacidades nucleares en 2029 hasta 2031 corresponden con 1360 MW por año de manera consecutiva.

(Megawatt)

Tecnología	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	Total ^{1/}
Convencionales	2,268	3,752	1,656	985	2,041	4,315	1,350	1,326	2,169	1,068	2,256	2,255	812	1,801	2,155	30,207
Ciclo Combinado	2,268	3,601	766	874	1,941	3,956	889	1,326	2,139	1,068	2,256	2,255	812	1,801	2,155	28,105
Carboeléctrica	0	129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	129
Turbogás	0	0	890	0	100	317	0	0	30	0	0	0	0	0	0	1,337
Combustión Interna	0	22	0	111	0	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	176
Lecho fluidizado	0	0	0	0	0	0	461	0	0	0	0	0	0	0	0	461
Limpia	3,165	4,200	2,740	2,699	2,810	1,856	3,029	1,541	1,266	1,872	1,342	2,843	2,959	2,576	1,805	36,705
Renovable	2,483	4,199	2,740	2,659	2,569	1,487	2,760	1,541	710	1,492	1,218	821	1,599	1,216	1,805	29,301
Hidroeléctrica	0	29	0	0	0	0	464	63	0	46	432	71	646	0	463	2,213
Eólica	677	1,716	1,537	734	2,369	1,187	1,997	1,116	220	850	303	400	353	611	750	14,819
Geotérmica	25	0	0	0	0	0	0	26	150	250	133	0	100	105	53	842
Solar Fotovoltaica	1,767	2,455	1,203	1,925	200	300	300	336	340	346	350	350	500	500	540	11,413
Termosolar	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
Otras	682	1	0	40	241	370	268	0	556	380	124	2,022	1,360	1,360	0	7,404
Bioenergía	3	0	0	40	241	286	148	0	98	0	124	0	0	0	0	940
Cogeneración Eficiente	679	1	0	0	0	84	120	0	457	380	0	662	0	0	0	2,383
Nucleoeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,360	1,360	1,360	0	4,081
Total^{1/}	5,433	7,952	4,396	3,684	4,852	6,171	4,378	2,867	3,435	2,940	3,598	5,098	3,771	4,377	3,960	66,912

^{1/} Los Totales pueden no coincidir por redondeo. Fuente: elaborado por la SENER con datos de la CFE, la CRE y el CENACE.

FIG. 3. INCREMENTO DE LA ENERGÍA NUCLEAR AL 2032 [8]

En los años posteriores, y hasta la actualidad, se ha puesto en pausa la contemplación, desde un punto de vista más sólido, el aumento y despliegue de las capacidades de generación energética por fuentes nucleares. Aunque en un principio parte de nuestras planificaciones contemplaban los aumentos anteriormente citados, la investigación se centró en la aplicación de las herramientas y metodologías del OIEA para la correcta planificación energética de tecnologías nucleares.

Capítulo 2. CICLOS DE COMBUSTIBLE.

2.1. DEFINICION DE CICLOS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR

La serie de procesos relacionados a los materiales fértiles y fítiles para la obtención de energía nuclear y su consecuente reprocesamiento o almacenamiento de residuos se conoce como ciclo de combustible nuclear. El ciclo parte de la etapa inicial de obtención del mineral de uranio y todos los procesos asociados a su conversión en material combustible (*Front-end*) hasta su irradiación en el núcleo del reactor, y su procesamiento, posible reutilización, y disposición final (*Back-end*).

Asociados al front-end están los siguientes aspectos:

- ✓ Exploración de mineral de uranio: actividades relacionadas con el hallazgo y desarrollo del mineral de uranio para la producción de uranio.
- ✓ Extracción de mineral de uranio: actividades relacionadas con la extracción de mineral de uranio del suelo.
- ✓ Procesamiento de mineral de uranio: actividades relacionadas con la molienda y refinación del mineral para producir concentrados de uranio, incluida la lixiviación in situ (comúnmente denominada torta amarilla — diuranato de amonio que contiene 80 a 90% de U_3O_8).
- ✓ Conversión: actividades relacionadas con la refinación y conversión a la forma que es apto para los procesos de enriquecimiento.
- ✓ Enriquecimiento: actividades relacionadas con el enriquecimiento isotópico de UF_6 para obtener la concentración de U_{235} requerida para ser utilizada en el reactor nuclear.
- ✓ Fabricación de combustible de uranio: actividades relacionadas con la producción de combustible nuclear a emplear en el reactor nuclear.

Asociados al back-end están los siguientes aspectos:

- ✓ Almacenamiento temporal de combustible nuclear gastado en el reactor: actividades relacionadas con el almacenamiento de combustible gastado en un reactor.

- ✓ Instalaciones de almacenamiento de combustible gastado (tipo húmedo) durante un período intermedio.
- ✓ Almacenamiento de combustible gastado fuera del reactor (AFR): actividades relacionadas con el almacenamiento de combustible gastado más allá del sitio del reactor (tipo húmedo o seco).
- ✓ En el ciclo de combustible cerrado, reprocesamiento y reciclaje de combustible gastado: actividades relacionadas con el tratamiento especial de combustible gastado para poder extraer los materiales utilizables y reciclarlos en los reactores.
- ✓ Acondicionamiento del combustible gastado: actividades relacionadas con la producción de contenedores de combustible gastado apto para manipulación, transporte, almacenamiento y/o eliminación.
- ✓ Eliminación definitiva de combustible gastado: actividades relacionadas con el emplazamiento de combustible gastado, y desechos de alto nivel radioactivo, en una instalación apropiada sin la intención de su recuperación.

Ciclo de combustible abierto

El ciclo de combustible abierto es el modo de operación en el que el material nuclear pasa a través del reactor una sola vez. Después de la irradiación, el combustible se mantiene en piscinas en el reactor hasta que se envía para su disposición final después de ser acondicionado. Esta estrategia del ciclo de combustible es la que actualmente adoptan la mayoría de los países con energía nuclear.

Ciclo de combustible cerrado

El ciclo de combustible cerrado es el modo de operación en el que, después de un período de enfriamiento suficiente, el combustible gastado se reprocesa para extraer el uranio y el plutonio remanentes, los productos fisión y otros actínidos; en la figura 4 se resumen los dos ciclos de combustible nuclear existentes. A continuación, el uranio y el plutonio reprocesados se reutilizan en los reactores.

Esta estrategia de reciclaje ha sido adoptada por algunos países principalmente en reactores de agua ligera (LWR, por sus siglas en inglés) en forma de combustible de óxidos mixtos de uranio y plutonio (MOX). Además de la experiencia actual de reciclaje en LWR, otra práctica de ciclo de combustible cerrado consiste en el reciclado de materiales nucleares en reactores rápidos (FR, por sus siglas en inglés), en los que se recicla el uranio y el plutonio reprocessados. Mediante un diseño y una operación adecuada, estos reactores pueden producir más plutonio fisionable del que consumen.

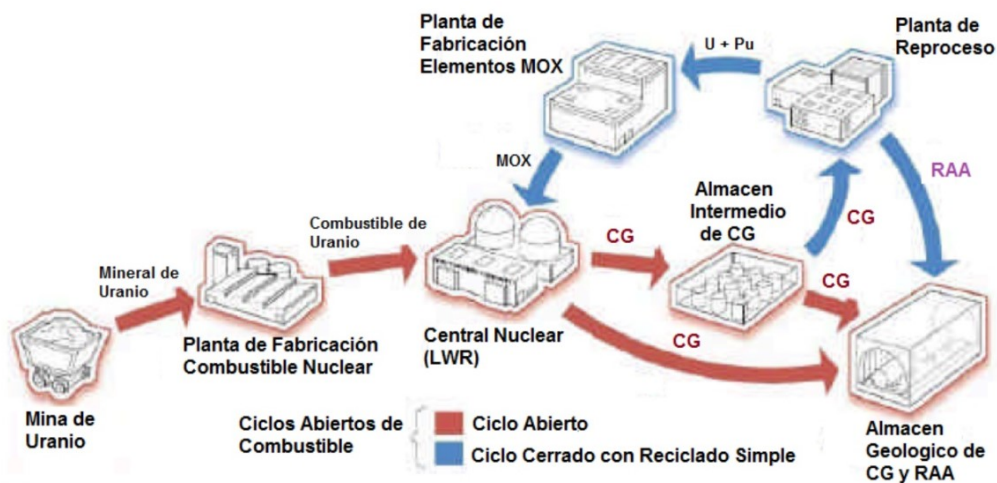


FIG. 4. CICLOS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR ABIERTO Y CERRADO [9].

El uranio es un elemento que se encuentra ampliamente distribuido dentro de la corteza terrestre. Su uso principal es como el combustible principal de los reactores nucleares de potencia. El uranio natural se compone de aproximadamente 99.3% de U_{238} , 0.7% de U_{235} y trazas de U_{234} . El U_{235} es el isótopo fisionable del uranio, es decir, los átomos tienen una alta probabilidad de fisionarse después de la captura de un neutrón térmico. En primera instancia el uranio tiene que ser extraído del mineral y convertido en un compuesto que se puede utilizar posteriormente en el ciclo del combustible nuclear. La forma de el uranio que se usará en el siguiente paso se llama concentrado de uranio y se conoce comúnmente como torta amarilla debido a su color.

Asociados a todos los procesos descritos en el ciclo de combustible nuclear, se rigen las ecuaciones de masa que permiten realizar el cálculo en todas las etapas necesarias del proceso y las cuales se citan a continuación:

1. Carga anual de combustible fresco:

$$FF = \frac{365 \times NC \times Lf}{Eff \times Bu}$$

Donde:

NC: la capacidad (GWe).

Lf: factor de carga.

Eff: eficiencia térmica.

Bu: quemado de descarga (GWd/tHM).

2. Primera carga (combustible en el núcleo):

$$FuelInCore = \frac{FF \times Tr}{365 \times Lf}$$

Donde:

FF: combustible fresco (tHM).

Lf: factor de carga.

Tr: tiempo de residencia del combustible en el reactor (EFPD: *Effective full power days*).

3. Consumo de uranio natural:

$$NatU = \frac{FF \times (Enr - Ta)}{0.007114 - Ta}$$

Donde:

Enr: enriquecimiento del combustible fresco.

Ta: concentración de las colas del proceso de enriquecimiento.

0.007114 es el contenido de U-235 en el uranio natural.

4. Conversión:

$$Cn = NatU$$

5. Unidades de Trabajo Separativo (SWU, por sus siglas en inglés) del proceso de enriquecimiento:

$$SWU = FFx \left[V(Enr) + V(Ta) \frac{Enr - 0.007114}{0.007114 - Ta} - V(0.007114) \frac{Enr - Ta}{0.007114 - Ta} \right]$$

Donde $V(x)$ es la función de valor, que se aplica para $x = 0.007114$ (uranio natural), Enr (enriquecimiento del uranio) y Ta (concentración de las colas del proceso de enriquecimiento):

$$V(x) = (1 - 2x) \ln \left(\frac{1 - x}{x} \right)$$

6. Producción de uranio empobrecido:

$$DepU = FFx \frac{Enr - 0.007114}{0.007114 - Ta}$$

7. Combustible gastado descargado:

$$SFD = FF$$

Empleando las ecuaciones de la 1 a la 7 se puede calcular los siguientes parámetros:

- Requerimientos anuales de combustible fresco.
- Primera carga de combustible (combustible en el núcleo).
- Requerimientos anuales de enriquecimiento.
- Cantidad anual de uranio empobrecido producido.
- Requerimientos anuales de conversión.

- Requerimientos anuales de uranio natural.
- Cantidad descargada de combustible gastado anualmente.

“Ciclo de combustible cerrado con una unidad de reactor rápido FR y combustible MOX con plutonio multireciclado”.

Para este modelo, el reactor rápido usa combustible MOX para el núcleo y uranio empobrecido para las cobijas (*blankets*) (FIG.5). La razón de conversión del reactor es aproximadamente uno. Todos los procesos del ciclo del combustible nuclear tienen algunas pérdidas de materiales; sin embargo, sólo las pérdidas por reprocesamiento se tienen en cuenta en este caso. Se supone que todas las demás pérdidas de proceso son cero.

La composición del grupo de nucleídos (mezcla de *blankets* + MOX) se basa en dos años de enfriamiento del combustible gastado después de la descarga del reactor, y los productos reprocesados se basan en un año de reprocesamiento. El decaimiento de plutonio y los actínidos menores en *stock* no se tiene en cuenta en este cálculo. La figura 5 muestra el ciclo cerrado planteado en un FR_MOX, donde la fabricación de MOX y *blankets* se realiza con combustible gastado de uranio procedente de otros reactores. Su posterior inclusión y quemado en el núcleo del reactor dará como resultado combustible gastado de MOX y *blankets*, que serán enfriadas un cierto período y luego llevadas a plantas de reprocesado donde se recuperará parte del plutonio, el cual se enviará a la fabricación de MOX y así se cierra el ciclo de combustible.

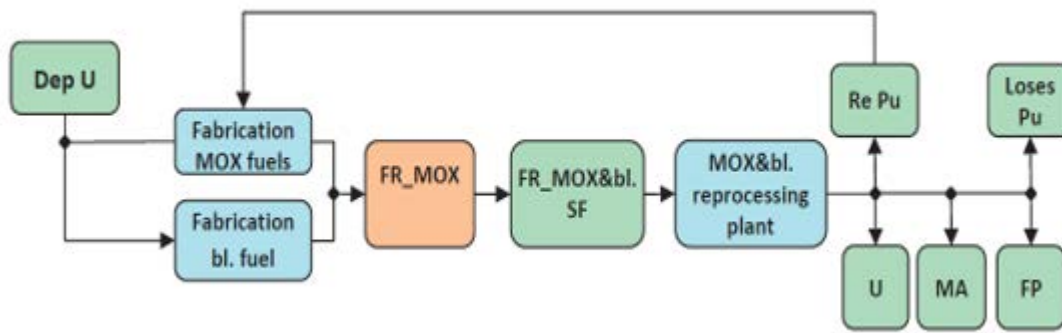


FIG. 5. DIAGRAMA DE CICLO DE COMBUSTIBLE CERRADO PARA FR_MOX [10]

Las ecuaciones utilizadas para calcular los flujos de masa en el caso FR_MOX son los siguientes:

1. Carga anual de combustible fresco:

$$FF = \frac{365 \times NC \times FuLoad_i}{Tr_i}$$

Donde:

NC: la capacidad nuclear (GWe).

Tr: tiempo de residencia del combustible en el reactor (EFPD).

i= (Núcleo, Blanket Radial, Blanket Axial).

2. Combustible gastado descargado:

$$SFD = FFMOX + FFAx + FFRad$$

Donde:

FFMOX: Combustible MOX fresco (tHM).

FFAx: Blanket axial de combustible fresco (tHM).

FFRad: Blanket radial de combustible fresco (tHM).

3. Plutonio reprocesado empleado:

$$RepPuUsed = FFMOX \times TotPuFF$$

Donde:

TotPuFF: Contenido de plutonio fresco.

4. Reprocesado de combustible gastado:

$$SFR = \min \left(SFD, \frac{RepPuUsed}{TotPuSFx(1 - RepLos)} \right)$$

Donde:

RepLos: Factor de pérdida en el reprocesado.

SFD: Combustible gastado descargado.

TotPuSF: Total de plutonio en el combustible gastado.

RepPuUsed: Plutonio reprocesado empleado.

5. Plutonio reprocesado:

$$RepPu = SFRxTotPuSFx(1 - RepLos)$$

Donde:

RepLos: Factor de pérdida en el reprocesado.

TotPuSF: Total de plutonio en el combustible gastado.

SFR: Combustible gastado reprocesado.

6. Pérdidas de plutonio:

$$LosPu = SFRxTotPuSFxRepLos$$

Donde:

SFR: Combustible gastado reprocesado.

TotPuSF: Total de plutonio.

RepLos: Factor de pérdida en el reprocesado.

7. Actínidos menores reprocesados:

$$RepMA = SFRxTotMASF$$

Donde:

SFR: Combustible gastado reprocesado.

TotMASF: Actínidos menores en el combustible gastado.

8. Productos de fisión reprocesados:

$$RepFP = SFRxTotFPSF$$

Donde:

SFR: Combustible gastado reprocesado.

TotFPSF: Productos de fisión en el combustible gastado.

Cabe mencionar que las ecuaciones anteriormente descritas, y que incluyen todo el ciclo de combustible nuclear, están codificadas en el *Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS)*¹, herramienta de cálculo empleada en esta tesis y presentada en los capítulos siguientes.

2.2. PROYECTOS E INVESTIGACIONES ENFOCADOS EN CICLOS MAS EFICIENTES

La estrategia francesa recomendada por la *Commission Nationale d'Evaluation* (2012-2015) [11] enfatiza la preparación para una transición de los reactores de agua ligera (LWR) a reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR). Los autores de este artículo utilizan la herramienta Cyclus para explorar la viabilidad del uso de combustible nuclear gastado (SNF, por sus siglas en inglés) de otras naciones de la Unión Europea (UE) para la transición francesa a una flota SFR sin construcción adicional de LWR. Se realizó una simulación con Cyclus para un escenario entre 1950 y 2160, para que la UE rastree la masa de SNF y para determinar el reprocesamiento y el combustible de óxidos mixtos (MOX) requeridos para apoyar la transición a SFR. El estudio concluye que Francia puede evitar el despliegue de LWR adicionales al aceptar el SNF de otras naciones de la UE.

¹ <https://infcis.iaea.org/NFCSS>

COSI es un código desarrollado por la División de Energía Nuclear del Comisariado para la energía atómica y las energías renovables de Francia (CEA, por sus siglas en francés) y utilizado para simular la evolución de una flota de reactores nucleares y las instalaciones asociadas del ciclo del combustible. COSI toma como entrada parámetros de instalaciones del ciclo del combustible y características de reactores, características de tipos de combustible y sucesión de cargas. COSI proporciona salidas sobre las masas isotópicas en las instalaciones del ciclo del combustible y los reactores durante un período definido. Los cálculos de post-procesamiento dan acceso a cantidades físicas de interés: actividad, radiotoxicidad, calor de desintegración, etc. COSI está acoplado con el código de agotamiento del combustible, CESAR, desarrollado por la División de Energía Nuclear del CEA y AREVA, que realiza todos los cálculos de agotamiento (irradiación y enfriamiento) durante la simulación del escenario. CESAR es el código de referencia utilizado en la planta de reprocesamiento. Se han realizado estudios de optimización de escenarios de transición desde la actual flota nuclear francesa a una flota de reactores rápidos de sodio para la obtención de escenarios óptimos y la validación de la metodología implementada, es decir, el acoplamiento entre el software de simulación COSI, los modelos sustitutos de agotamiento y un método de optimización de algoritmos genéticos [12].

La factibilidad del software NFSCC se han estudiado en ciclos de combustible cuyo objetivo principal es evaluar el impacto que los escenarios más probables para el futuro desarrollo de la energía nuclear. Escenarios con reciclaje de MOX y quemado de TRU (OECD/NEA, 2002), diferentes etapas de entrada de reactores rápidos y reciclado de plutonio [13] [14].

Capítulo 3. CODIGOS Y MODELOS PARA LA PLANEACION DE LA ENERGIA NUCELAR

Los modelos para la planificación de la energía nuclear son herramientas matemáticas que permiten simular y predecir el comportamiento de los sistemas de energía nuclear a largo plazo, teniendo en cuenta factores como la demanda de energía, la oferta de combustible, la capacidad de generación, la infraestructura necesaria, los costos y los impactos ambientales y sociales [15]. Estos modelos utilizan datos históricos y proyecciones futuras para generar diferentes escenarios y evaluar el desempeño de cada uno de ellos. Además, permiten la evaluación de riesgos y la identificación de soluciones óptimas para la planificación y gestión de los sistemas de energía nuclear. Entre los modelos más utilizados se encuentran los modelos de optimización como MESSAGE, que permiten la identificación de soluciones óptimas de costo-beneficio, y los modelos de simulación, que permiten la evaluación del comportamiento del sistema ante diferentes situaciones y escenarios. Los modelos para la planificación de la energía nuclear son herramientas clave para la toma de decisiones informadas y eficientes en la planificación y gestión de los sistemas de energía nuclear a largo plazo.

En relación con los modelos para la planificación de la energía nuclear, es importante mencionar que existen diferentes enfoques y metodologías utilizadas para su desarrollo. Estos modelos permiten evaluar diversas opciones y escenarios energéticos, considerando factores técnicos, económicos y ambientales. A continuación, se describirán los modelos utilizados en la planificación de la energía empleados en el presente documento [16] [17]

3.1. SISTEMAS DE SIMULACION DE CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR (NFCSS)

El Sistema de simulación del ciclo de combustible nuclear (NFCSS, por sus siglas en inglés) [18] es un sistema de simulación basado en escenarios, para estimar los requerimientos de servicio y los materiales del ciclo de combustible nuclear a largo plazo, así como la producción de materiales. El Sistema de Simulación del Ciclo de Combustible Nuclear (NFCSS, anteriormente conocido como VISTA) fue

desarrollado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para estimar el ciclo de combustible nuclear a largo plazo, requerimientos de materiales y servicios, para una opción dada del ciclo de combustible nuclear.

Con NFCSS podemos calcular, por año, durante largos periodos de tiempo, los requerimientos del ciclo de combustible nuclear para todos los tipos de reactores. Los cálculos se pueden realizar para un reactor, parque de reactores en un país o parque de plantas de energía nuclear en todo el mundo. Se pueden calcular las cantidades de **uranio natural, conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible**. Además, las cantidades y calidades (composición isotópica) de los combustibles descargados se pueden evaluar para permitir que el usuario aplique una estrategia de reciclaje si lo desea. La velocidad de cálculo del sistema es lo suficientemente rápida como para permitir la comparación de diferentes opciones en un tiempo considerablemente corto. Los requisitos de combustible fresco y la composición isotópica del combustible gastado se calculan automáticamente, a partir de un conjunto de parámetros internos que han sido seleccionados por expertos en el programa. El usuario puede optar por utilizar las reservas de combustible gastado para desarrollar una estrategia de reciclaje. La estimación de la acumulación de actínidos, incluidos los actínidos menores, es una de las capacidades de la simulación. Esas estimaciones de acumulación podrían usarse para comparar cualquier opción futura de ciclo de combustible para la transmutación de actínidos menores.

El modelo utiliza enfoques simplificados para calcular los requerimientos del ciclo de combustible a largo plazo para las estrategias de ciclo de combustible tanto abierto como cerrado.

Los parámetros de entrada utilizados en el modelo se pueden dividir en tres grupos:

Parámetros de la estrategia: capacidad nuclear y estrategias de reprocesamiento y reciclaje, mezcla de tipos de reactores y factores de carga, etc., sobre una base anual.

Parámetros de combustible: quemado de descarga promedio, enriquecimiento inicial promedio y composición de colas promedio, etc., sobre una base anual.

Parámetros de control: participación del combustible MOX en el núcleo de los reactores que utilizan este tipo de combustible, tiempos de demora de los diferentes procesos, coeficientes de pérdida en los procesos, uso de uranio empobrecido o enriquecido, el número de ciclos de reprocesamiento, etc.

Los resultados se dividen en los siguientes grupos:

Front End: requisitos de uranio natural, requisitos de conversión, requisitos de servicio de enriquecimiento y requisitos de combustible fresco.

Back End: combustible gastado producido, generación de nucleidos individuales, incluyendo uranio, plutonio y actínidos menores, requisitos de reprocesamiento.

En la figura 6 se muestran los parámetros de entrada y salida del NFCSS. El lado izquierdo muestra los parámetros de entrada requeridos, mientras que el lado derecho muestra la lista de parámetros de salida para el Front End y el Back End.

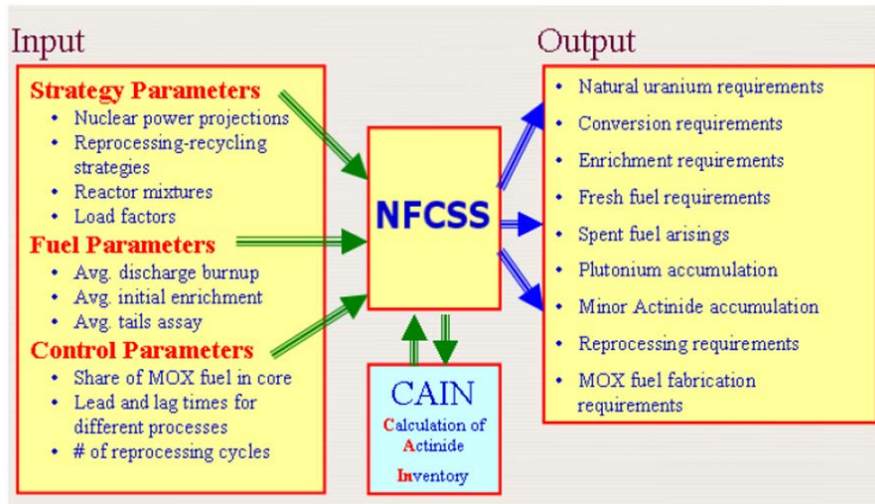


FIG. 6. FLUJO DE DATOS NFCSS [18]

3.2. MESSAGE.

MESSAGE (Modelo para Alternativas de la Estrategia de Suministro de Energía y sus Impactos Ambientales Generales) [10] es un software diseñado para establecer modelos de sistemas de energía (es decir suministros y utilización de energía) para la optimización. MESSAGE se desarrolló originalmente en el Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA). El OIEA adquirió la última versión de MESSAGE y ha realizado varias mejoras en él, y lo más importante es la adición de una interfaz de usuario para facilitar su aplicación. El principio subyacente de un modelo construido utilizando el MESSAGE, es la optimización de una función objetivo bajo un conjunto de restricciones que definen la región factible que contiene todas las soluciones posibles del problema. El valor de la función objetivo ayuda a elegir la solución que se considera mejor de acuerdo con los criterios especificados. En la categorización general los modelos construidos usando el MESSAGE pertenecen a la clase de modelos de programación entera mixta, ya que pueden contener algunas variables enteras. Se puede usar un conjunto de solucionadores de estándares (por ejemplo, glpk y cplex) para resolver estos modelos.

Un modelo de energía está diseñado para formular y evaluar estrategias de suministro de energías alternativas en consonancia con las limitaciones definidas por el usuario, tales como: límites a nuevas inversiones, disponibilidad de combustible y comercio, regulaciones ambientales y tasas de penetración de mercado para nuevas tecnologías. Los aspectos ambientales pueden analizarse mediante la contabilidad, limitando las cantidades de contaminantes emitidos por diversas tecnologías en varios pasos en el suministro de energía. Esto ayuda a evaluar el impacto de las regulaciones ambientales en el desarrollo del sistema de energía. En una primera aproximación un modelo construido usando el MESSAGE podría etiquetarse como un modelo de flujo físico.

MESSAGE permite modelar todos los pasos en los flujos de energía de la oferta a la demanda, que generalmente se conoce como cadena de energía y los pasos se llaman niveles.

La columna vertebral del MESSAGE es un marco flexible que permite una descripción detallada del sistema de energía que se modela. Esto incluye la

definición de formas de energía en cada nivel de las cadenas de energía, tecnologías que producen o usan estas formas de energía, y los recursos energéticos. Las formas de energía y las tecnologías se pueden definir para todos los pasos de las cadenas de energía.

La versión actual del software MESSAGE se compone de los siguientes componentes:

- ✓ Una interfaz de usuario para construir un modelo.
- ✓ Bases de datos.
- ✓ Un programa de generación de matriz llamado (mxg).
- ✓ Un programa de optimización llamado (opts).
- ✓ Un programa para el procesamiento posterior de la solución para la extracción de resultados llamada (cap).

La interfaz de usuario proporciona un conjunto de ventanas para construir un modelo y la preparación de su base de datos. También proporciona ventanas para ejecutar los programas mxg, opt y cap. El programa mxg usa la base de datos para generar una matriz del modelo, que es resuelta por el solucionador seleccionado en el programa opt. El programa de post-procesamiento utiliza el archivo de solución del programa opt y prepara los resultados en un formato estándar que cubre algunas partes seleccionadas de la solución (figura 7). La interfaz de usuario proporciona ventanas para la extracción de estos resultados. También proporciona una ventana para la extracción de las otras partes de la solución, según lo seleccionado por el usuario. En esta ventana el usuario puede procesar los resultados extraídos para obtener el resultado final en la forma deseada.

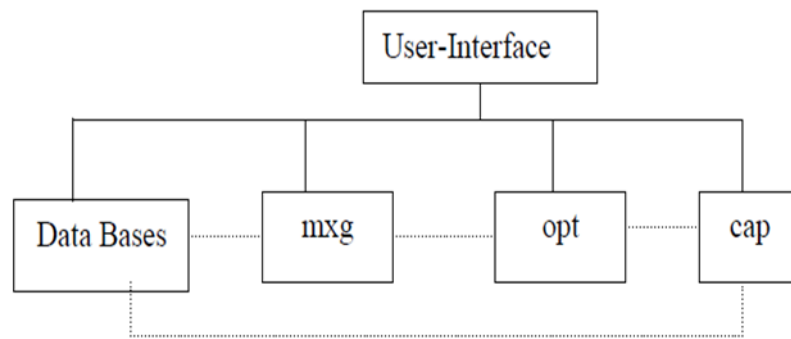


FIG. 7. MÓDULOS DEL MESSAGE [10]

El ciclo del combustible nuclear (NFC, por sus siglas en inglés) consta de pasos individuales y se refiere a todas las actividades relacionadas con el uso de materiales fisionables como combustible principal en los reactores de fisión. Las actividades del combustible nuclear comienzan con la extracción de mineral de uranio y finalizan con la eliminación de desechos radiactivos generados durante la operación de un reactor.

Existen muchas posibilidades de organización del NFC. Las variantes dependen de las siguientes opciones:

- a) El NFC abierto o cerrado, dependiendo de si el combustible gastado se reutiliza o no;
- b) combustible gastado con un reciclado o multi-reciclado;
- c) composición del combustible: UO_2 , PuO_2 , MOX, UC, PuN, etc.;
- d) espectro del reactor (térmico o rápido);
- e) cría de combustible;
- d) material fértil (uranio y/o torio).

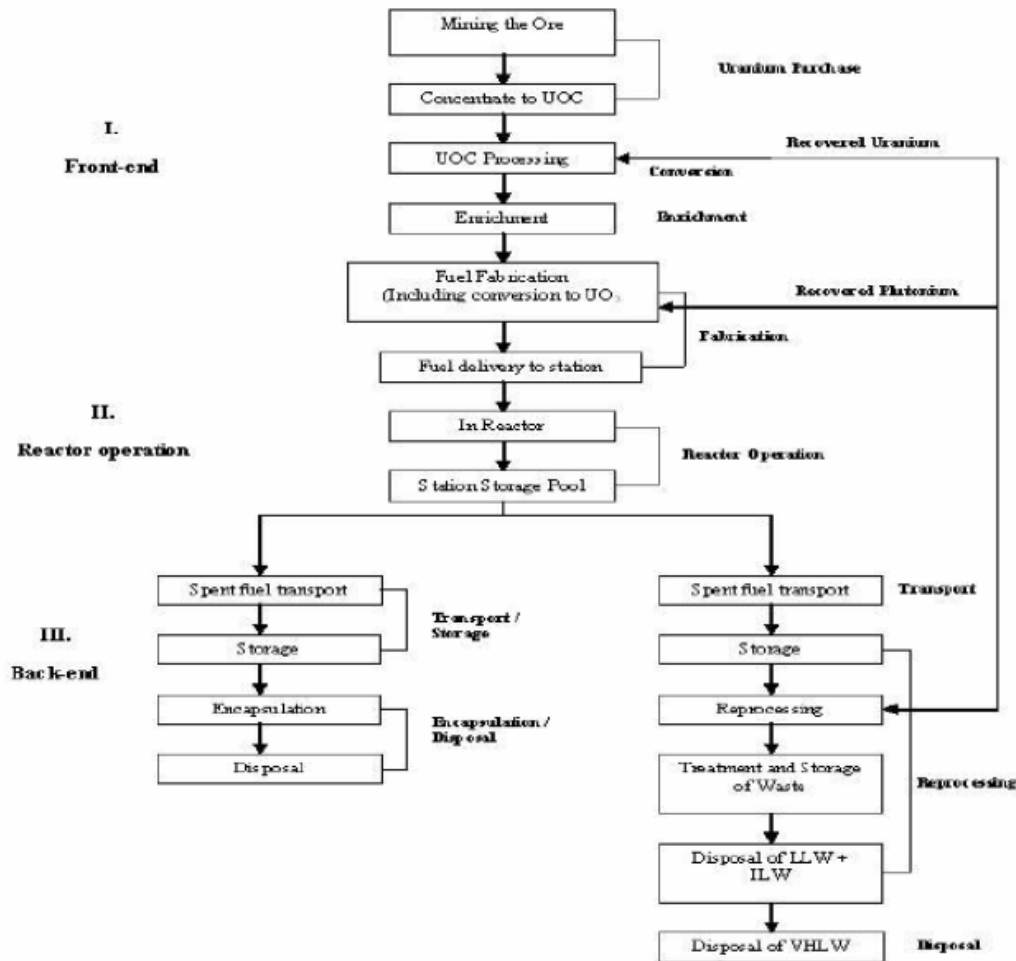


FIG. 8. CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR [10]

El MESSAGE se puede aplicar para el modelado del ciclo del combustible nuclear de ciclo abierto y opciones cerradas (figura 8). Todas las características específicas del ciclo del combustible nuclear pueden tener en cuenta:

Descripción de flujos de materiales nucleares (composiciones combustibles, elementos separados o isótopos) y materiales de estructura a través de todos los pasos del ciclo de combustible nuclear.

- ✓ Los retrasos en el ciclo del combustible nuclear pueden modelarse con la tecnología MESSAGE.
- ✓ El tiempo de retardo variable o el tiempo de retención en almacenamiento
- ✓ Se puede modelar cualquier tipo de almacenaje (enfriamiento, disposición final, etc.)
- ✓ El reactor nuclear se puede describir como una instalación de varias zonas.

MESSAGE [19] utiliza valores promedio anuales como datos de entrada, sólo se puede modelar el estado estacionario de los reactores nucleares y los flujos del NFC. Los cambios en la composición isotópica para isótopos separados pueden tenerse en cuenta siempre que estén disponibles los datos de cálculos del reactor para diferentes etapas del ciclo del combustible. Para la comparación de prospectos de reactores nucleares innovadores debe haber disponible un intervalo de tiempo de por lo menos 120 años con pasos de un año.

3.3. HERRAMIENTAS Y METODOLOGIAS EMPLEADAS CON BASE EN EL OIEA

Desde su creación, el Organismo Internacional de Energía Atómica ha trabajado arduamente en difundir guías y documentos técnicos para todas las naciones interesadas en desarrollar o expandir el uso pacífico de la energía nuclear. Estos documentos proporcionan una base para la toma de decisiones informada y segura, y se han convertido en una herramienta vital para garantizar la seguridad nuclear, la no proliferación y el uso pacífico de la energía atómica. En esta línea, el OIEA ha desarrollado diversos modelos para la planificación de la energía nuclear, los cuales ofrecen una guía práctica y útil para aquellos países que desean explorar esta opción energética, los cuales han sido puestos a disposición de los Estados Miembros un conjunto de herramientas y metodologías enfocadas en la evaluación y toma de decisiones de propuestas de expansión nuclear. Dichas herramientas de cálculo fueron el pilar principal de estudio y análisis de esta tesis. A continuación, se citan y esbozan las principales herramientas usadas.

3.3.1. KIND.ET EVALUATION TOOLS

KIND-ET [19] es una plantilla Excel basada en la teoría del valor de múltiples atributos (MAVT), desarrollada para el proyecto colaborativo INPRO titulado: Indicadores clave para sistemas innovadores de energía nuclear (KIND), como una herramienta de guía para evaluar la sostenibilidad de las innovaciones. KIND-ET se basa en el método MAVT y en un conjunto de recomendaciones de proyectos KIND.

KIND-ET es una herramienta adaptada para la evaluación comparativa de las perspectivas, los beneficios y los riesgos asociados con el desarrollo de tecnologías nucleares, incluidas las opciones para un futuro relativamente distante. Con su arquitectura y las capacidades funcionales de KIND-ET, los usuarios pueden modificar fácilmente esta herramienta para tener en cuenta sus preferencias. KIND-ET puede ayudar a identificar los méritos y deméritos de las tecnologías nucleares que se comparan en diferentes circunstancias y evaluar sus rangos generales, teniendo en cuenta el rendimiento del sistema energético nuclear, por sus siglas en inglés **NES**, así como los juicios y preferencias de los expertos y los tomadores de decisiones. Las características del KIND-ET incluyen un uso fácil, una interfaz fácil de usar, capacidades de automatización y visualización para integrarse con herramientas convenientes para administrar y procesar los resultados del cálculo. La herramienta proporciona cierta flexibilidad para explorar diferentes enfoques y técnicas en la implementación del método “teoría del valor de múltiples atributos”, por sus siglas en inglés **MAVT**, para el objetivo KIND. Al mismo tiempo, KIND-ET toma en cuenta los rasgos característicos del enfoque KIND y las recomendaciones. Los siguientes principios y requisitos básicos se utilizaron para desarrollar el software KIND-ET: orientación e integración de problemas; facilidad de uso y obviedad intuitiva; automatización y mejora; autosuficiencia y multifuncionalidad; apertura y extensibilidad; dependencia de Microsoft Office e integración web. La herramienta KIND-ET cubre la mayoría de las etapas formales del proceso de apoyo a la toma de decisión relacionadas con el uso de un método matemático específico: implementación del método MCDA, realización de análisis de incertidumbre y sensibilidad, y formulación de conclusiones y recomendaciones finales. Para realizar una comparación de criterios múltiples utilizando el método MAVT, es necesario seleccionar un conjunto de indicadores de rendimiento; identificar una estructura del árbol de objetivos; preparar una tabla de rendimiento; determinar funciones de valor de atributo único para cada indicador; evaluar factores de ponderación; realizar análisis de sensibilidad; interpretar los resultados de la clasificación y formular recomendaciones. Todos los pasos mencionados deben especificarse en KIND-ET dentro de la solución de un problema determinado.

3.3.1.1. Teoría del valor de múltiples atributos (MAVT)

La base del método MAVT es un concepto de una función de valor de atributo único. Las funciones de valor de atributo único se utilizan cuando se conoce información cuantitativa sobre cada alternativa. Cada indicador tiene una función de valor de atributo único creada para él. Estas funciones transforman diversos indicadores evaluados en una escala "natural" en una escala o puntuación común y sin dimensiones (de 0 a 1), conocida como una función de valor de atributo único. Estas puntuaciones se ponderan de acuerdo con su importancia. Para identificar la alternativa preferida, los expertos deben multiplicar los puntajes de cada alternativa normalizada en los factores de ponderación correspondientes para todos los indicadores de una alternativa, que reflejan las preferencias de los expertos y los tomadores de decisiones. Los puntajes generales (funciones de valor de múltiples atributos ver ecuación 1) indican los rangos de las alternativas. La alternativa preferida tendrá el puntaje general más alto.

La forma general de la función de valor de múltiples atributos es:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) + k \sum_{\substack{i=1 \\ j>i}}^n k_i k_j u_i(x_i) u_j(x_j) + k^2 \sum_{\substack{i=1 \\ j>i \\ l>j}}^n k_i k_j k_l u_i(x_i) u_j(x_j) u_l(x_l) + \dots \\ + k^{n-1} k_1 k_2 \dots k_n u_1(x_1) u_2(x_2) \dots u_n(x_n), \text{ donde } 1 + k = \prod_{i=1}^n (1 + k k_i)$$

ECUACIÓN 1. ECUACIÓN DE LA FUNCIÓN MAVT

Donde: $u_i(x_i)$ es la función de valor de atributo único para el indicador i que se escala de 0 a 1, k_i es el peso para el indicador i .

El tipo de función de valor de múltiples atributos, ampliamente aplicado en diferentes estudios (denominado "modelo aditivo de la función de valor de múltiples atributos"), tiene la siguiente forma:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i), \text{ donde } \sum_{i=1}^n k_i = 1$$

3.3.2. KIND ET EVALUATION TOOLS EXTENSIONES

3.3.2.1. RANKS MAPPING TOOLS

Dentro del enfoque KIND, se supone que, en el nivel más alto del árbol de objetivos, se deben especificar dos o tres objetivos de alto nivel en categorías agregadas para poder determinar los méritos y deméritos asociados con las opciones en consideración. El responsable de la toma de decisiones es responsable de asignar las ponderaciones de los objetivos de alto nivel dentro del procedimiento de evaluación comparativa basado en MCDA. Los criterios relevantes de los tomadores de decisiones siempre son subjetivos y deben adaptarse a las condiciones nacionales locales. Para ayudar a los tomadores de decisiones a alcanzar una mejor comprensión de las opciones preferibles para diferentes pesos en los objetivos de alto nivel, resulta útil proporcionar datos apropiados en una representación visual conveniente. Para hacer frente a este problema, se debe realizar un análisis de sensibilidad global de los resultados de la clasificación con respecto a los pesos de los objetivos de alto nivel. *Ranks Mapping Tool* es una herramienta de visualización basada en Excel que extiende la funcionalidad KIND-ET para identificar las opciones que toman el primer rango y resaltar áreas relacionadas en el espacio de peso de objetivos de alto nivel. Los datos relevantes presentados en forma tabulada dentro de *Ranks Mapping Tool* [19] se visualizan mediante el formato condicional de Excel. Las áreas coloreadas indican las combinaciones de pesos para las cuales una opción específica toma el primer rango. Por lo tanto, esta forma de visualizar a través de imágenes en un mapa de preferencias proporciona una mejor comprensión de cuán prometedora y sólida es la clasificación de cada opción en términos de ponderaciones de objetivos de alto nivel.

3.3.2.2 Overall Score Spread Builder - Score Evaluator

- Overall Score Spread Builder - Weight Generator

- Overall Score Spread Builder – Randomizer

General Score Spread Builder [19] es una herramienta basada en Excel que extiende la funcionalidad KIND-ET para las evaluaciones de los diferenciales de puntaje general de las opciones, causados por incertidumbres en los factores de ponderación y la estructura de árbol de objetivos. Dentro de esta herramienta, se examina el impacto de la incertidumbre del factor de ponderación en los resultados de la clasificación, utilizando la variación estocástica (probabilística) de las ponderaciones que representan la importancia relativa de un solo indicador. Este enfoque permite determinar las distribuciones de probabilidad de los puntajes y rangos de opciones, teniendo en cuenta las incertidumbres en los factores de ponderación. Dentro de este enfoque, se supone que todos los pesos están distribuidos aleatoria y uniformemente en el rango de 0 a 1, restringidos sólo por condiciones de normalización.

3.3.2.3 Domination Identifier.

Domination Identifier [19] es una extensión basada en Excel para KIND-ET, la cual representa una herramienta analítica para identificar opciones no dominadas y dominadas de un conjunto de opciones consideradas factibles. Para identificar las opciones dominadas y no dominadas dentro de la herramienta, se utiliza la siguiente observación: en términos de los valores normalizados de los indicadores (suponiendo que el peor valor normalizado de un indicador clave es cero y el mejor valor normalizado de un indicador clave es la unidad), los valores normalizados de los indicadores para una determinada opción (llamada "dominada") serán más bajos que todos los valores normalizados de los indicadores clave para una opción (llamada "dominante"). Con base en esta observación, *Domination Identifier* crea una tabla que demuestra las opciones dominadas y dominantes.

3.4. Antecedentes en la aplicación de la metodología de INPRO.

Como parte de la aplicación completa de todas las herramientas anteriormente descritas, se realizó un estudio completo, el cual será resumido a continuación y cuyos objetivos fueron los siguientes:

Realizar una comparación preliminar de NES, a nivel tecnológico, buscando sistemas sostenibles a largo plazo en cuanto al uso de recursos naturales y manejo de residuos. Es necesario obtener todos los flujos de materiales NFC en unidades específicas (por unidad de producción de energía) para llevarlos a una forma comparable. Algunos ejemplos son los recursos naturales utilizados, el rendimiento del ciclo del combustible nuclear y la economía.

Obtener conocimientos sobre cómo aplicar adecuadamente las herramientas del INPRO [20] [21] [22] para analizar los sistemas energéticos futuros de México en las nuevas condiciones nacionales y globales.

Capítulo 4. CREACIÓN DE LAS DOS ETAPAS DE ESCENARIOS CONFIGURADOS

A continuación, se describe la metodología planteada y aplicada en la investigación, aspectos técnicos y estructuración de los escenarios estudiados. En las secciones de 4.1 a 4.1.4 (ETAPA A) queda planteada la estructura de los seis escenarios a los cuales se les aplicaron todas las herramientas y el enfoque KIND-ET con sus subherramientas, cuyos resultados se presentan en el capítulo 5, desde la sección 5.1.1 a 5.1.7.

Además, en una segunda etapa (ETAPA B) se planteó un enfoque considerando tecnologías independientes (ver secciones 4.2 a 4.3), donde a cada una de las tecnologías planteadas en la tabla 9 se le obtuvieron los parámetros del FRONT-END y BACK-END mostrados en el capítulo 5, secciones 5.2.1 a 5.2.6, con el NFCSS y que se estructuraron en el MESSAGE

4.1 DESCRIPCION DE LOS ESCENARIOS Y FLUJO DE LA METODOLOGIA APLICADA EN ETAPA A.

Todos nuestros casos de análisis tienen como objetivo hacer una comparación preliminar de los Sistemas de Energía Nuclear (NES, por sus siglas en inglés) a nivel tecnológico, en busca de sistemas sostenibles a largo plazo en términos del uso de recursos naturales y gestión de residuos. Es necesario obtener todos los flujos de material NFC en unidades específicas (por unidad de producción de energía) para llevarlos a una forma comparable. Ejemplo de ellos son los recursos naturales utilizados, el rendimiento del ciclo de combustible nuclear y la economía.

El enfoque KIND y la herramienta KIND-ET, como un conjunto de evaluación basado en MAVT, se aplicaron para evaluar la sostenibilidad de seis sistemas de energía nuclear a largo plazo hasta el año 2100, en los cuales se agregaron reactores de agua ligera y reactores rápidos avanzados con una participación diferente en cada NES que se exploró. El enfoque permitió comparar la sostenibilidad de los NES, incluso cuando tienen un nivel de madurez diferente.

Sabemos que los conjuntos específicos de KI utilizados en la herramienta KIND-ET pueden variar según el objetivo del estudio. Las áreas para considerar por INPRO son seguridad, economía, gestión de residuos, resistencia a la proliferación y protección física, medio ambiente, madurez de la tecnología y área específica del país. El área del medio ambiente tradicionalmente cubre aspectos relacionados con la utilización de recursos naturales, así como el impacto de los NES en el medio ambiente (no directamente relacionado con los problemas de residuos nucleares), que pueden especificarse mediante diversas métricas, como la cantidad de energía útil producida por el sistema (desde la minería hasta la eliminación del combustible gastado, incluyendo el enriquecimiento, la operación del reactor y la separación) por unidad de uranio natural extraído.

Los principales supuestos para los seis NES fueron:

- 1) El período de estudio es de 2030 a 2100.
- 2) Los dos BWR actuales de la central nuclear Laguna Verde están en operación al 2030 y se retirarán al final de su vida útil, se supone que será en el año 2050 y 2055 para la Unidad-1 y la Unidad-2 respectivamente.
- 3) Se supone que la capacidad de BWR en México para 2030 será de 1552 MW con una producción eléctrica anual promedio de 10874.6 GWh.
- 4) En 2030 se agrega nueva capacidad nuclear al sistema eléctrico mexicano para iniciar un nuevo NES.
- 5) La energía nuclear representará sólo el 10% de la demanda total anual de electricidad esperada para México al 2100, y eso significa una generación de 150,000 GWh.
- 6) Sólo se analiza la generación de electricidad a partir de diferentes tecnologías nucleares y sus implicaciones sin ninguna relación con las tecnologías no nucleares.
- 7) La energía total anual es la misma en las seis NES, y es la suma de la energía producida por las diferentes tecnologías nucleares del mix.
- 8) La producción de energía para cada año intermedio desde 2030 hasta 2100 se obtiene por interpolación lineal entre la energía nuclear en ambos años.

9) Los parámetros técnicos y económicos de las centrales eléctricas y las instalaciones del ciclo del combustible son indicativos.

10) La capacidad de las diferentes tecnologías en cada año se calculó a través del factor de capacidad promedio de los reactores que están participando en la producción de energía objetivo anual en todos los escenarios.

NES 1: Asume la adición de nueva capacidad nuclear basada en AP1000 (reactor de agua a presión) con 100% UOX (AP1000) de 1110 MW cada cuatro años desde 2030 hasta 2094.

NES 2: Asume la adición de nueva capacidad nuclear basada en AP1000 con 100% UOX (AP1000) de 1110 MW cada cuatro años desde 2030 hasta 2058, y EFR (reactor rápido europeo de sodio) de 1086,63 MW cada cuatro años desde 2062 hasta 2094.

NES 3: Asume la adición de nueva capacidad nuclear basada en AP1000 con 70% UOX y 30% MOX (AP1000MOX) de 1110 MW cada cuatro años desde 2030 hasta 2094.

NES 4: Asume la adición de nueva capacidad nuclear basada en AP1000 con 70 % UOX y 30 % MOX (AP1000MOX) de 1110 MW cada cuatro años desde 2030 hasta 2058, y EFR de 1086,63 MW cada cuatro años desde 2062 hasta 2094.

NES 5: Asume la adición de nueva capacidad nuclear basada en AP1000 con 70% UOX y 30% MOX (AP1000MOX) de 1100 MW cada cuatro años desde 2030 hasta 2094. En este escenario, el 50% del combustible descargado de LWR se reprocesa y se utiliza en combustible para MOX y EFR.

NES 6: Asume la adición de nueva capacidad nuclear basada en AP1000 con 70% UOX y 30% MOX (AP1000MOX) de 1100 MW cada cuatro años desde 2030 hasta 2058, y EFR de 1086,63 cada cuatro años desde 2062 hasta 2094. En este escenario, El 80 % del combustible descargado de los LWR se reprocesa y se utiliza como combustible para MOX y EFR.

En la figura 9 se muestra la secuencia metodológica utilizada en el estudio. Se crearon seis escenarios hipotéticos de NES con diferencias relevantes entre ellos en cuanto a configuración de tecnologías nucleares se refiere, aplicando la metodología del INPRO. Para la simulación del flujo de materiales nucleares de las

seis NES se utilizó el sistema de simulación del ciclo del combustible nuclear (NFCSS).

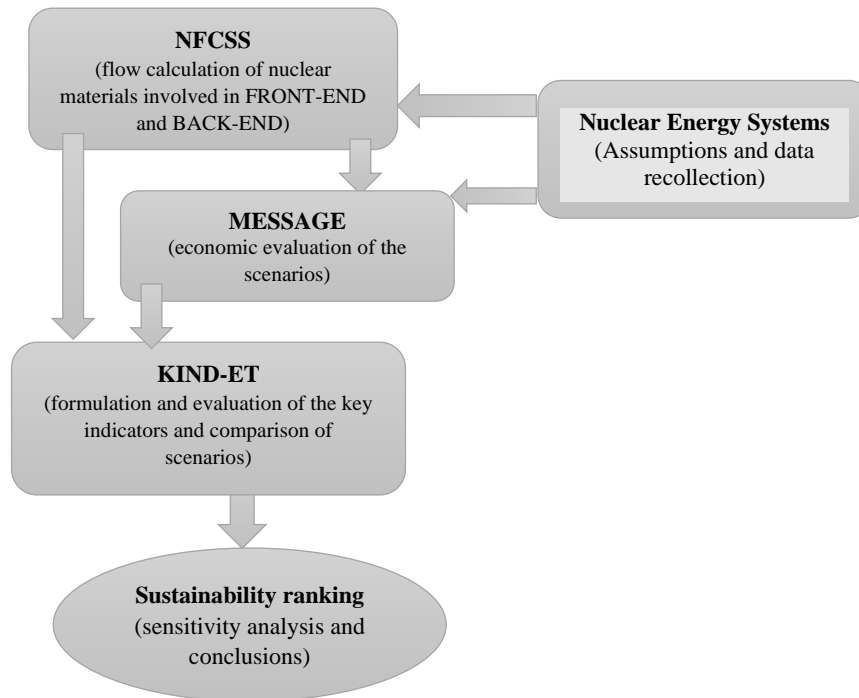


FIG. 9. METODOLOGÍA GENERAL APLICADA

4.1.1 PLANTEAMIENTO CON ENFOQUE KIND-ET

Para realizar una comparación multicriterio utilizando el método MAVT, se requiere seleccionar un conjunto de k-indicadores e identificar una estructura del árbol de objetivos; por lo que se consideraron tres objetivos de alto nivel, cinco áreas de evaluación y ocho indicadores clave, como se muestra en la figura 10.

Los siguientes pasos consisten en preparar la tabla de rendimiento y determinar las funciones de valor de atributo único para cada indicador. Considerando el árbol de la figura 10, es relevante decir que el objetivo de alto nivel de Economía considera un área de Costo, la cual se analiza a través de dos k-indicadores relacionados con los costos obtenidos por la simulación MESAGGE de cada NES estudio de caso. La

meta para los indicadores 3 y 5 es maximizar, para los otros seis indicadores es minimizar.

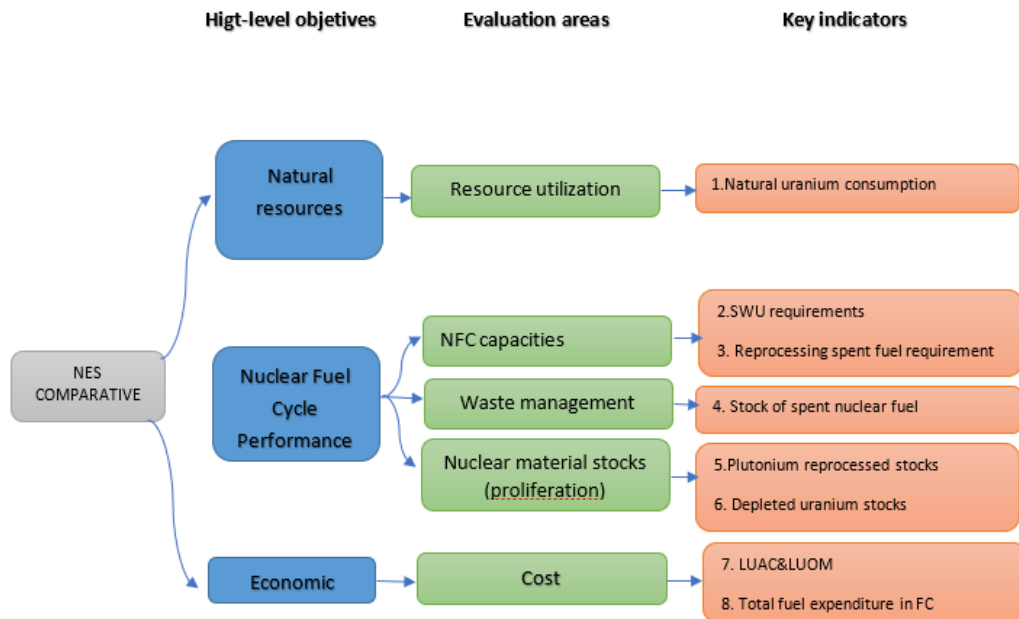


FIG. 10. ÁRBOL DE OBJETIVOS

El resto de k-indicadores se evalúan mediante parámetros de los flujos de materiales de la simulación NFCSS de cada NES. Para clasificar las NES, según su sostenibilidad, es necesario identificar qué indicador debe minimizarse (Min) y cuál debe maximizarse (Max) como meta. Toda la información anterior se utiliza para construir la tabla de rendimiento en KIND-ET. La tabla 1 muestra los componentes y objetivos de la tabla de rendimiento en KIND-ET en el presente.

TABLA 1. TABLA DE RENDIMIENTO

High-level objectives titles	Areas titles	Indicators titles	Indicators abbr.	Goal
Natural resources	Resource utilization	Natural uranium consumption	1 cumNatU	Min
Nuclear Fuel Cycle Performance	NFC capacities	SWU requirements	2 cumSWU	Min
Nuclear Fuel Cycle Performance	NFC capacities	Reprocessing spent fuel requirement	3 cumSF	Max
Nuclear Fuel Cycle Performance	Waste management	Stock of spent nuclear fuel	4 cumSFsto	Min
Nuclear Fuel Cycle Performance	Nuclear material stocks (proliferation)	Plutonium reprocessed stocks	5 cumPuR	Max
Nuclear Fuel Cycle Performance	Nuclear material stocks (proliferation)	Depleted uranium stocks	6 cumDUsto	Min
Economics	Cost	Levelized investment in NPP and O&M Costs	7 LUAC+LUOM	Min
Economics	Cost	Total fuel expenditure in Fuel Cycle	8 exFC	Min

El primer resultado obtenido al usar KIND-ET es una tabla con las funciones de valor de un solo atributo vs indicador. En el presente caso de estudio, la tabla se obtiene mediante una normalización lineal utilizando un dominio local de funciones de valor.

4.1.2 RESUMEN DE ASPECTOS TECNICOS DE REACTORES Y COMBUSTIBLE

La tabla 2 incluye información detallada sobre los parámetros tecnológicos de los reactores de agua ligera y de los reactores rápidos avanzados, tales como el tipo de combustible, el ciclo de combustible, la capacidad de generación de energía, la eficiencia del combustible, la vida útil del combustible y la carga de combustible. Estos parámetros fueron considerados esenciales para modelar la operación de los sistemas de energía nuclear a largo plazo y para poder evaluar su sostenibilidad en

términos de uso de recursos y gestión de residuos. Cabe destacar que los parámetros pueden variar en función de la tecnología del reactor y de las condiciones específicas de cada escenario. Los resultados obtenidos a partir de la simulación de los seis escenarios permitieron comparar y evaluar la sostenibilidad de los sistemas de energía nuclear a largo plazo en México, y proporcionaron información valiosa para la toma de decisiones en cuanto a la planificación energética y ambiental del país.

TABLA 2. PARÁMETROS DEL REACTOR.

Reactor parameter	Unit	BWR	AP1000	EFR
Power	MW	776	1110	1408
Burnup	GWd/tHM	43.5	60	80
Load factor	%	80	93	95
Fuel residence time	yr	4	4	4
Efficiency	%	33.5	35	40

Es importante destacar que la elección del combustible utilizado (tabla 3) en la simulación de los escenarios fue un factor clave para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de energía nuclear a largo plazo. La opción de utilizar combustibles mixtos, como el MOX, permite la reutilización de plutonio generado durante la operación de los reactores, lo que puede mejorar la eficiencia del combustible y reducir la cantidad de residuos radiactivos producidos. Por otro lado, la elección del combustible también depende de la disponibilidad y la calidad de los recursos naturales, así como de las restricciones tecnológicas y de seguridad relacionadas con su uso. Todos estos factores fueron considerados cuidadosamente al seleccionar los parámetros del combustible en la herramienta NFCSS. Los resultados obtenidos a partir de la simulación de los seis escenarios proporcionaron información valiosa sobre el impacto de la elección del combustible en la sostenibilidad de los sistemas de energía nuclear a largo plazo, lo que puede ser útil para orientar la toma de decisiones en la planificación energética y ambiental del país.

TABLA 3. PARAMETROS DEL COMBUSTIBLE

Fuel parameter	Unit	BWR	AP1000- UOX	AP1000- MOX	EFR
Power density	kW/kg	25.9	37.5	37.5	86.27
Cooling time	yr	6	6	7	7
Manufacturing time	yr	1	1	1	1
Reprocessing time	yr	1	1	1	1
Uranium content	%	U235(4) U238(96)	U235(4) U238(96)	U235(0.3)	U235(0.02)
Plutonium content	%	-	-	Pu238(1.36) Pu239(60.10) Pu240(21.62) Pu241(11.70) Pu242(5.20)	Pu238(2.27) Pu239(59.05) Pu240(25.89) Pu241(6.81) Pu242(5.97)

La tabla 4 describe los principales parámetros asumidos para los cálculos de material en las simulaciones de la herramienta NFCSS. Estos parámetros son fundamentales para estimar la cantidad de materiales involucrados en la producción de energía nuclear, así como los flujos de materiales que se generan durante todo el ciclo de combustible del sistema. Los parámetros incluyen la cantidad de combustible utilizado, la eficiencia de conversión de energía del reactor, la tasa de quemado del combustible, la cantidad de residuos radiactivos generados y su gestión, y la tasa de enriquecimiento de uranio. Todos estos parámetros son esenciales para evaluar la sostenibilidad y la viabilidad económica de los sistemas de energía nuclear a largo plazo. La herramienta NFCSS utiliza estos parámetros para simular diferentes escenarios de producción de energía nuclear y evaluar su impacto en términos de la gestión de recursos naturales, la generación de residuos radiactivos y la eficiencia energética. Los resultados obtenidos a partir de la simulación de los diferentes escenarios pueden ser utilizados para orientar la toma de decisiones en la planificación energética y ambiental del país.

TABLA 4. VALORES GLOBALES DE ENTRADA EN NFCSS

Process performance	Unit	Value
Tails Assay	%	0.3
Loss in Conversion	%	0.5
Loss in Enrichment	%	0.5
Loss in Fabrication	%	0.5
Loss in Reprocessing	%	0.5
Volume of HLW Generated in Reprocessing	%	0.15
Volume of ILW Generated in Reprocessing	%	0.35

En la tabla 5 se muestran los parámetros económicos utilizados en el modelo MESSAGE para simular diferentes escenarios de producción de energía nuclear. Los parámetros incluyen los costos de capital para la construcción de nuevos reactores, los costos de operación y mantenimiento, el costo del combustible y los costos asociados con la gestión de residuos radiactivos. Estos parámetros son fundamentales para estimar el costo total de la energía generada por las diferentes tecnologías de reactores nucleares, y son esenciales para evaluar la viabilidad económica de los diferentes escenarios de producción de energía nuclear. La herramienta MESSAGE utiliza estos parámetros para simular diferentes escenarios y evaluar su impacto en términos de costos de producción de energía y su competitividad en el mercado energético. Los resultados obtenidos a partir de la simulación de diferentes escenarios pueden ser utilizados para orientar la toma de decisiones en la planificación energética y económica del país.

TABLA 5. PARÁMETROS ECONÓMICOS UTILIZADOS EN MESSAGE

Technologies and associated costs	Unit	AP1000	EFR	Reference
NPP investment cost	US\$/kW(e)	3000	3500	TR No. NG-T-5.2
Fixed O&M cost	US\$/kW/yr	50	55	TR No. NG-T-5.2
Plantlife	yr	60	60	TR No. NG-T-5.2
Fuel fabrication cost	US\$/kg	300	1700	TR No. NG-T-5.2
Variable O&M cost	US\$/kWyr	10	10	TR No. NG-T-5.2
Reprocessing plant investment cost	US\$/kg/yr	5000	-	TR No. NG-T-5.2
Reprocessing plant O&M cost	US\$/kg	400		TR No. NG-T-5.2

La tabla 6 presenta los costos asociados con los procesos de combustible utilizados en las simulaciones de MESSAGE, donde cada NES fue construido utilizando como entrada los balances de material nuclear obtenidos de la salida de NFCSS. Los valores de los parámetros económicos en las tablas 5 y 6 tienen una incertidumbre, por lo que los más relevantes serán analizados utilizando la herramienta KIND. Los costos del combustible son un factor importante en la determinación del costo total de la energía generada por las diferentes tecnologías de reactores nucleares, y estos costos pueden variar ampliamente dependiendo del tipo de combustible utilizado, su eficiencia y otros factores. La herramienta MESSAGE utiliza estos costos para simular diferentes escenarios y evaluar su impacto en términos de costos de producción de energía y su competitividad en el mercado energético. La herramienta KIND, por su parte, es utilizada para analizar y evaluar la sostenibilidad de los diferentes escenarios de producción de energía nuclear, teniendo en cuenta aspectos como la seguridad, la gestión de residuos, la protección física y otros factores clave.

TABLA 6. COSTOS ASOCIADOS AL COMBUSTIBLE UTILIZADOS EN MESSAGE

Process name	Unit	Value	Reference
Conversion	US\$/KgU as UF ₆	14	UxC
Natural uranium	US\$/Kg	46	UxC
SWU Enrichment	US\$/SWU	110	UxC
UO ₂ fuel fabrication cost	US\$/Kg	300	WNO ²
MOX fuel fabrication cost	US\$/Kg	1200	TR No. NG-T-5.2
EFR fuel fabrication cost	US\$/Kg	1700	TR No. NG-T-5.2
Cooling cost for LWR	US\$/Kg	5	TR No. NG-T-5.2
Cooling cost for EFR	US\$/Kg	7.5	TR No. NG-T-5.2
Cooling cost for LWRMOX	US\$/Kg	7.5	TR No. NG-T-5.2
Interim storage cost	US\$/Kg	4	TR No. NG-T-5.2
Plutonium storage cost	US\$/Kg	2000	TR No. NG-T-5.2
Plutonium from LWR recovered	US\$/Kg	62310	TR No. NG-T-5.2

4.1.3 VALORACION DE INDICADORES CLAVE

La Tabla 7 muestra los valores de los indicadores clave, los cuales son representados por las salidas correspondientes de NFCSS y MESSAGE. Los valores obtenidos a partir de NFCSS, para los indicadores KI-1 hasta KI-6, son valores acumulativos de materiales divididos por valores acumulativos de electricidad generada durante el período comprendido entre 2030 y 2100. El indicador KI-7 es un valor promedio para el mismo período y el indicador KI-8 es un valor acumulativo durante el período completo. Estos indicadores clave son de gran importancia para evaluar la eficiencia y la sustentabilidad de las opciones de energía nuclear. El NFCSS es una herramienta fundamental para la planificación y el análisis de la cadena de suministro de combustible nuclear, mientras que MESSAGE es una herramienta de modelización para la evaluación de políticas energéticas a largo plazo. El uso de estos modelos permite analizar el impacto de las opciones de energía nuclear en el ciclo de vida completo de la generación de energía eléctrica, desde la extracción y procesamiento de los materiales hasta la disposición final de los residuos nucleares. De esta manera, se pueden tomar decisiones informadas para garantizar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad

de la energía nuclear como parte de una matriz energética diversificada y equilibrada.

TABLA 7. VALUACIÓN DE INDICADORES CLAVE

Indicadores abr.	MIN score	MAX score	NES-1	NES-2	NES-3	NES-4	NES-5	NES-6	Units
1 cumNatU	9.2	19.4	19.4	13.5	13.9	9.8	13.4	9.2	tHM*10 ³ /GWh
2 cumSWU	5.6	11.2	11.2	7.8	8.0	5.6	8.0	5.6	Mtswu*10 ³ /GWh
3 cumSF	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	tHM*10 ³ /GWh
4 cumSFsto	16.2	56.5	56.5	53.6	56.5	53.6	39.1	16.2	tHM*10 ³ /GWh
5 cumPuR	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	tHM*10 ³ /GWh
6 cumDUsto	310.0	507.5	507.5	423.4	367.4	310.0	367.4	310.0	tHM*10 ³ /GWh
7 LUAC+LUOM	324.4	348.2	324.4	348.15	324.4	341.49	324.4	338.0	US\$/kWyr
8 exFC	1.6	15.8	15.8	5.8	6.7	4.6	2.2	1.6	US\$/10 ⁹

4.1.4 FACTORES DE PESO PARA OBJETIVOS, ÁREAS E INDICADORES

Luego de haber establecido los indicadores clave para la evaluación del NES, el siguiente paso es evaluar los factores de ponderación. La asignación de los factores de ponderación a los objetivos de alto nivel, áreas de evaluación e indicadores clave requiere especial atención, ya que tendrán un impacto directo en la evaluación total del NES. Por esta razón, es importante definir de antemano las áreas de mayor importancia para cada región o país en particular, a fin de realizar la mejor selección de indicadores y asignarles el peso adecuado.

En la tabla 8 se muestra el conjunto de pesos asignados a los objetivos, áreas e indicadores en el estudio de caso. Esta asignación de pesos se basó en la importancia relativa de cada objetivo y área de evaluación en función de las metas y prioridades de la región en cuestión. Con esto, se logra una evaluación más precisa y significativa del NES, permitiendo identificar áreas críticas que necesitan atención y mejorar la planificación y gestión de la energía nuclear en el futuro.

TABLA 8. PESOS ASIGNADOS A LOS OBJETIVOS, ÁREAS E INDICADORES

High-level objective	HL obj. weight	Area	Area weight	Indicator abbr.	Indicator weight	Final weight
Natural resources	0.35	Resource utilization	1	1 cumNatU	1	0.350
Nuclear Fuel Cycle Performance	0.35	NFC capacities	0.3	2 cumSWU	0.9	0.095
				3 cumSF	0.1	0.011
		Waste management	0.4	4 cumSFsto	1	0.140
		Nuclear material stocks (proliferation)	0.3	5 cumPuR	0.2	0.021
				6 cumDUsto	0.8	0.084
Economics	0.3	Cost	1	7 LUAC+LUOM	0.65	0.195
				8 exFC	0.35	0.105

4.2 ESTRUCTURA DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS EN NFCSS

En escenarios previamente experimentados, se definían previamente las configuraciones de las tecnologías nucleares y sus participaciones en el mix energético (AP1000, BWR, EFR, etc.) conformando de esta forma diferentes escenarios, los cuales fueron evaluados y comparados posteriormente aplicando las diversas metodologías y obtuvimos los rangos finales de jerarquías en cuanto a nuestros criterios seleccionados. En un enfoque final, inicialmente se realizó un análisis por tipo de tecnología, empleando el software **NFCSS** (tabla 9) donde cada una de las propuestas, por separado, asume la misma entrega de energía durante todo el periodo de estudio (2030-2100).

TABLA 9. RESUMEN DE LAS TECNOLOGÍAS PLANTEADAS POR SEPARADO EN NFCSS.

Tecnología	Descripción
Ap1000-UOX	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en AP1000 (reactor de agua a presión) con 100% de UOX
Ap1000-30%Mox	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en AP1000 (reactor de agua a presión) con 30% de MOX
Ap1000-50%Mox	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en AP1000 (reactor de agua a presión) con 50% de MOX
Ap1000-70%Mox	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en AP1000 (reactor de agua a presión) con 70% de MOX
Ap1000-90%Mox	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en AP1000 (reactor de agua a presión) con 90% de MOX
Ap1000-100%Mox	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en AP1000 (reactor de agua a presión) con 100% de MOX
ABWR-UOX	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en ABWR (reactor avanzado de agua en ebullición) con combustible tipo UOX.
EFR	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en EFR (Reactor rápido europeo)
PWR-U233-TH	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en PWR con combustible Uranio-Torio.
PWR-PU-TH	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en PWR con combustible Plutonio-Torio.
ABWR-U233-TH	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en ABWR con combustible Uranio-Torio.
ABWR-PU-TH	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en ABWR con combustible Plutonio-Torio.
PHWR	Supone la adición de nuevas capacidades nucleares basadas en PHWR (Reactor de Agua pesada)

4.2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS TRECE ESCENARIOS PARA CADA TECNOLOGÍA NUCLEAR.

Como se muestra en la tabla anterior, se consideraron diferentes tecnologías de reactores nucleares bajo los mismos supuestos de generación y horizonte de tiempo para suplir cierta demanda. Cada una de las tecnologías y sus combinaciones de combustibles fueron declaradas y alimentadas en NFCSS. Con sus principales parámetros asumidos para los cálculos de materiales en las simulaciones NFCSS.

TABLA 10. VALORES GENERALES DE OPERACIÓN EN NFCSS

Process performance	Unit	Value
Tails Assay	%	0.3
Loss in Conversion	%	0.5
Loss in Enrichment	%	0.5
Loss in Fabrication	%	0.5
Loss in Reprocessing	%	0.5
Volume of HLW Generated in Reprocessing	%	0.15
Volume of ILW Generated in Reprocessing	%	0.35

La tabla 11 resume la descripción del combustible utilizado en la herramienta NFCSS para simular cada una de las tecnologías planteadas. Para la tecnología AP1000, el combustible puede ser óxido de uranio (UOX) o UOX combinado con óxido mixto (MOX) o solo MOX. El combustible MOX que se usa en los reactores de agua ligera actuales representa una mezcla de óxidos de uranio y plutonio. Todos los cálculos de flujo de materiales se basan en masas de metales pesados y la unidad es tHM (toneladas de metales pesados).

TABLA 11. PARÁMETROS DE COMBUSTIBLE UTILIZADOS EN NFCSS

Fuel parameter	Unit	BWR	AP1000-UOX	AP1000-MOX	EFR	ABWR U233-ThOX 1	PWR U233-ThOX 1	ABWR PU-ThOX	PWR Pu-ThOX
Power density	kW/kg	25.9	37.5	37.5	86.27	25.9	37.5	25.9	37.5
Cooling time	yr	6	6	7	7	6	6	6	6
Manufacturing time	yr	1	1	1	1	1	1	1	1
Reprocessing time	yr	1	1	1	1	1	1	1	1
Uranium content	%	U235(4) U238(96)	U235(4) U238(96)	U235(0.3)	U235(0.02)	Th232(96)	Th232(96)	Th232(90.65)	Th232(90.65)
Plutonium content	%	-	-	Pu238(1.36) Pu239(60.10) Pu240(21.62) Pu241(11.70) Pu242(5.20)	Pu238(2.27) Pu239(59.05) Pu240(25.89) Pu241(6.81) Pu242(5.97)	U233(0.04)	U233(0.04)	Pu238(0.23) Pu239(5.11) Pu240(2.45) Pu241(0.89) Pu242(0.67)	Pu238(0.23) Pu239(5.11) Pu240(2.45) Pu241(0.89) Pu242(0.67)

4.3. ESTRUCTURACION DE ESCENARIOS EN MESSAGE ETAPA B

La planificación y modelación energética es un proceso complejo que requiere la introducción de una cadena de procesos lógicos en los modelos utilizados. En el caso de MESSAGE, y para la simulación nuclear, esta cadena se encuentra estructurada en cuatro áreas fundamentales: recursos, front end, back end y cadena secundaria de energía. La primera se encarga de definir los recursos energéticos disponibles. La segunda área, el front end, se ocupa de la etapa inicial del ciclo de combustible nuclear, que abarca desde la extracción del uranio hasta la fabricación del combustible para los reactores nucleares. El back end, por su parte, se centra en la gestión y tratamiento del combustible gastado, de los residuos radiactivos y el desmantelamiento de las instalaciones nucleares. Por último, la cadena secundaria de energía se encarga de la producción de energía a partir de combustibles derivados del uranio y del plutonio. Ver figura 15.

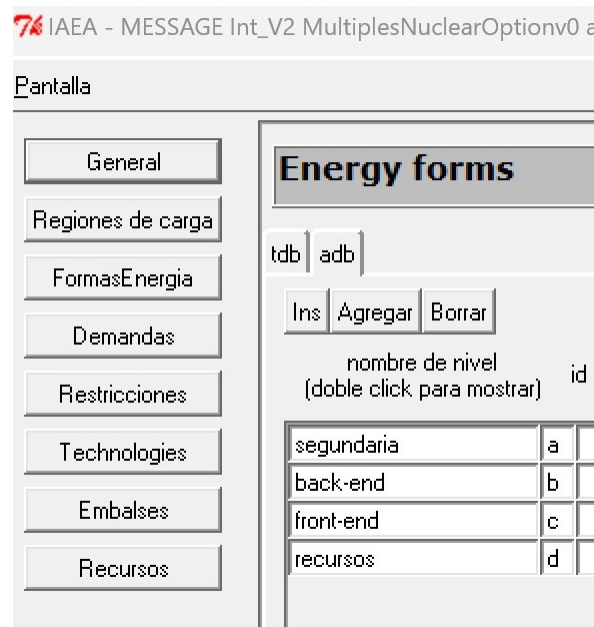


FIG. 11. CADENA DE PROCESOS EN MESSAGE

En nuestro modelo de planificación energética, los recursos naturales que estarán disponibles para el sistema serán el uranio natural y el plutonio (figura 16) obtenido a través del reciclaje de combustible nuclear o mediante procesos de transmutación del U-238 en reactores rápidos. El uranio natural será utilizado en los reactores de agua ligera, mientras que el plutonio será utilizado en los reactores rápidos y en los reactores de agua pesada. Estos recursos serán gestionados y distribuidos en las diferentes áreas del sistema energético de acuerdo con su disponibilidad y demanda en cada momento, y su utilización estará sujeta a las normas y regulaciones de seguridad y protección radiológica establecidas por los organismos reguladores correspondientes. Con una adecuada gestión y planificación de los recursos, se espera garantizar un suministro seguro, sostenible y eficiente de energía nuclear a largo plazo.

forma de energía	id	reg-c	fijo	tipo	unidad	descripcion
NatUranio	a	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	ton	
Plutonio	b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	ton	

FIG. 12. RECURSOS NATURALES DECLARADOS EN MESSAGE

El proceso del front-end es esencial en el ciclo del combustible nuclear y comprende una serie de etapas que incluyen la conversión del uranio a hexafluoruro de uranio (cn), el proceso de enriquecimiento y las unidades de trabajo separativas empleadas (sw), la producción y ensamblaje de combustible nuclear(en). En la figura 17 se puede observar cómo se aplican estos procesos en las diferentes tecnologías. La conversión del uranio a hexafluoruro de uranio se realiza mediante procesos químicos, mientras que el enriquecimiento se lleva a cabo mediante unidades de trabajo separativo. La producción y ensamblaje de combustible nuclear varían según la tecnología empleada y son clave para el correcto funcionamiento de los reactores nucleares. Cada uno de los procesos tienen un costo asociado y las demandas fueron calculadas previamente en NFCSS

74 Nivel:front-end

Ins | Agregar | Borrar | Salvar | Salir

forma de energia	id	reg-c	fijo	tipo	unidad	unidad	descripcion
cnAp1000UOX	d	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
enAp1000UOX	e	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
swAp1000UOX	f	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuAp1000UOX	g	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
cnAp1000MOX30UOX	h	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
enAp1000MOX30UOX	i	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
swAp1000MOX30UOX	j	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuAp1000MOX30UOX	k	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuAp1000MOX30	l	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
cnAp1000MOX50UOX	m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
enAp1000MOX50UOX	n	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
swAp1000MOX50UOX	o	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuAp1000MOX50UOX	p	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuAp1000MOX50	r	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
cnAp1000MOX70UOX	s	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
enAp1000MOX70UOX	t	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
swAp1000MOX70UOX	u	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuAp1000MOX70UOX	v	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuAp1000MOX70	w	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
cnABwRUOX	x	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
enABwRUOX	y	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
swABwRUOX	z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuABwRUOX	a	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼
fuEFR	b	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	▼	ton	▼

FIG. 13. FRONT-END EN MESSAGE

En el ciclo de vida de la energía nuclear, el back-end es una fase crucial para garantizar la seguridad y la protección radiológica. En este sentido, el modelo de Message (figura 18) incluye una descripción detallada de los procesos de traslado y almacenamiento del combustible nuclear gastado, los cuales son fundamentales para el manejo seguro y eficiente de los residuos radiactivos. Las cantidades de combustible nuclear gastado que se manejan en el back-end ya han sido previamente definidas mediante los datos de salida de NFCSS y los costos asociados a estas operaciones han sido extraídos de fuentes de datos nucleares fiables. De esta manera, el modelo puede proporcionar información precisa y confiable sobre los costos y las implicaciones técnicas y de seguridad del manejo de los residuos radiactivos.

74 Nivel:back-end

Ins Agregar Borrar Salvar Salir

forma de energia	id	reg-c	fijo	tipo unidad	unidad	descripcion
dummy	c	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAP1000UOX	d	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAP1000MOX30UOX	e	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAP1000MOX30	f	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAP1000MOX50UOX	g	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAP1000MOX50	h	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAP1000MOX70UOX	i	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAP1000MOX70	j	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFABWROUX	m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFEFR	n	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	weight	ton	
SFPwRU33TH	o	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	ton	
SFPwRPUH	p	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAwBRU33TH	q	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	ton	
SFAwRPUH	r	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	ton	
PHWR	s	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	weight	ton	

FIG. 14. BACK-END EN MESSAGE

Como etapa final (figura 19) del proceso el subproducto resultante, será la energía generada y entregada a la red del sistema eléctrico.

El proceso completo de la energía nuclear consta de varias etapas, y como etapa final, se tiene la generación y entrega de energía a la red del sistema eléctrico. La cantidad de energía generada y entregada dependerá de la capacidad de la planta y su disponibilidad operativa. Por lo tanto, el proceso completo de la energía nuclear es una cadena de etapas y procesos interconectados, cada uno de ellos con su importancia y complejidad.

74 Nivel:segundaria

Ins Agregar Borrar Salvar Salir

forma de energia	id	reg-c	fijo	tipo unidad	unidad	descripcion
electricidad	b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	energy	GWh	

FIG. 15. FORMA SECUNADARIA RESULTANTE

Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSION.

5.1. ETAPA A

La Etapa A engloba la evaluación completa de los seis escenarios descritos en el capítulo 4, diferenciándose de la Etapa B en cuanto al enfoque aplicado.

5.1.1 Etapa A

La figura 20 muestra la evolución de la capacidad instalada en el período por cada escenario. Podemos observar que los seis escenarios propuestos producen la misma cantidad anual de electricidad (figura 21). La cantidad acumulada de electricidad producida durante el período 2030 a 2100 es cercana a los 6252 TWh. La contribución de cada tecnología de reactor en el valor total es resultado del cronograma de instalación de cada NES.

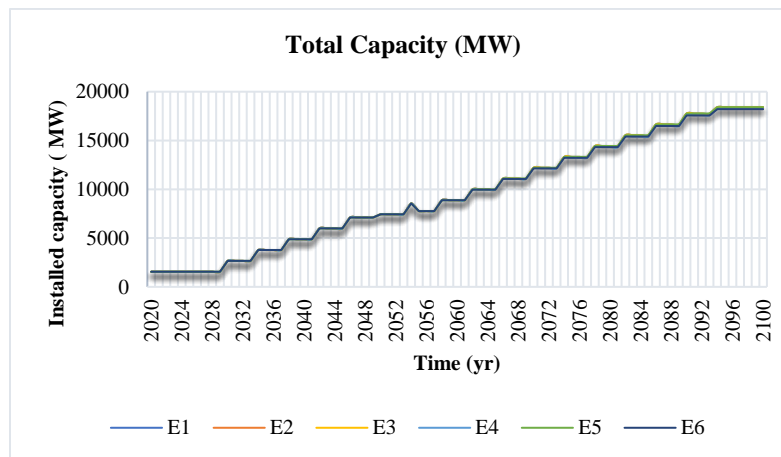


FIG. 16. CAPACIDAD INSTALADA TOTAL EN NES-1 A NES-6

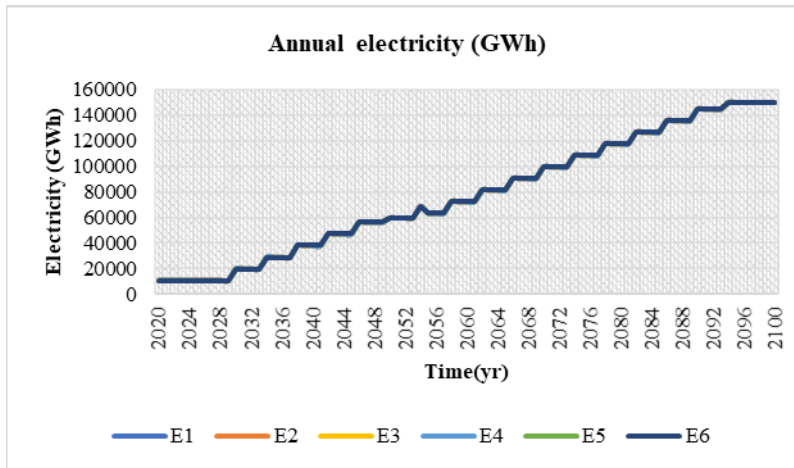


FIG. 17. GENERACIÓN ANUAL TOTAL EN NES-1 A NES-6

La instalación de cada NES en el horizonte de tiempo resulta en una contribución diferente de cada tecnología de reactor en el valor total. Esta contribución se puede visualizar en las figuras 22-26, donde se muestra la capacidad instalada acumulada para cada tecnología de reactor en función del tiempo. La capacidad instalada acumulada es un indicador importante para medir el progreso y la eficiencia en la implementación de cada NES. Además, la capacidad instalada acumulada también afecta directamente a la contribución de cada tecnología de reactor en el valor total del sistema energético. Por lo tanto, es crucial tener en cuenta tanto el calendario de instalación como la capacidad instalada acumulada al evaluar la contribución de cada tecnología de reactor en el valor total del sistema energético.

E1

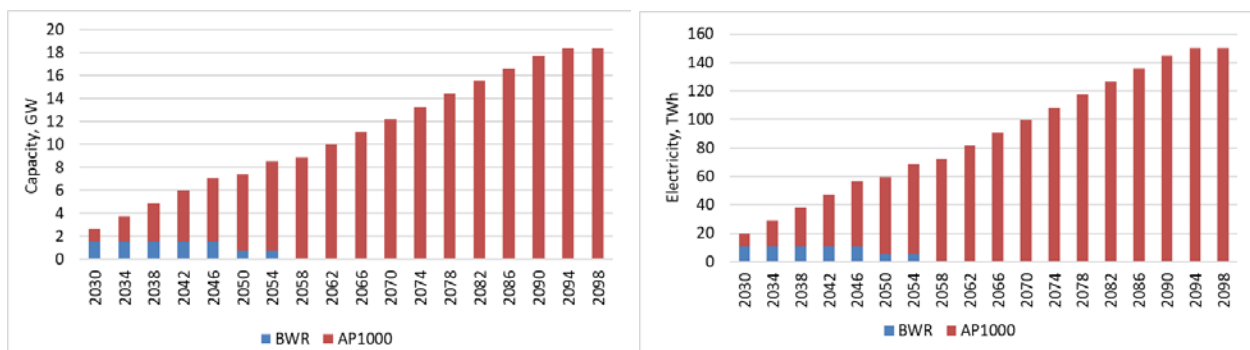


FIG. 18. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 1

E2

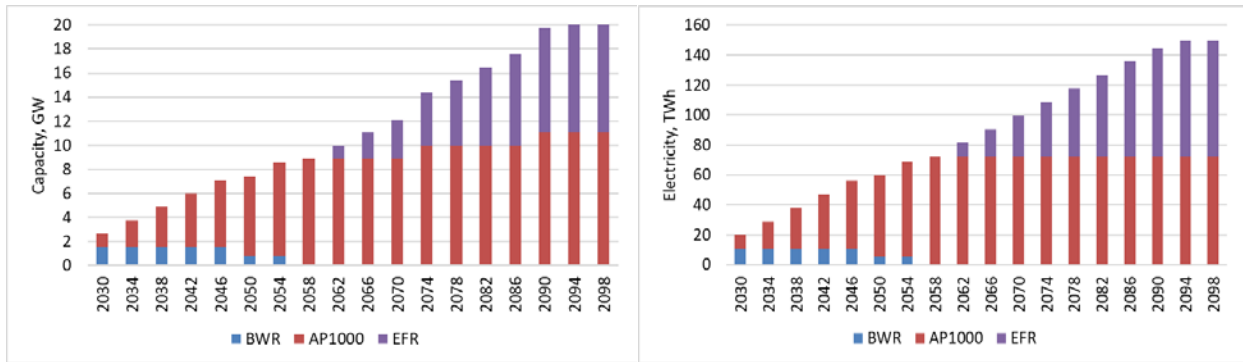


FIG. 19. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 2

E3

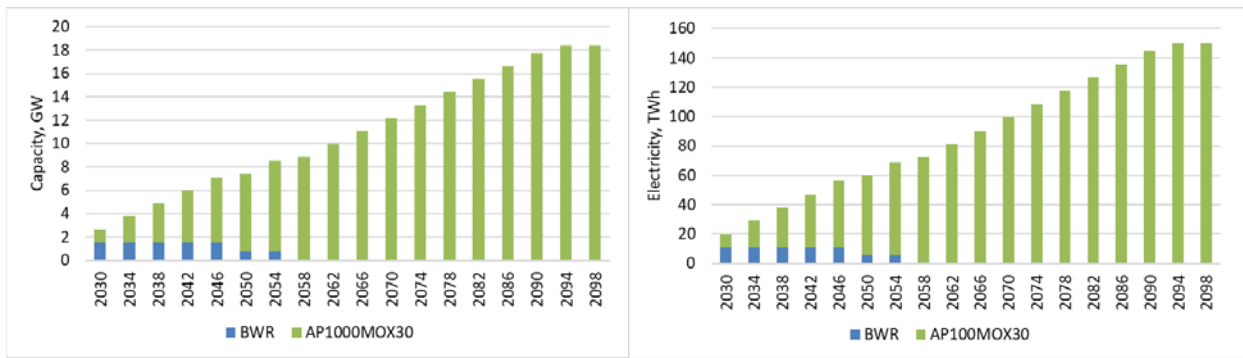


FIG. 20. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 3

E4

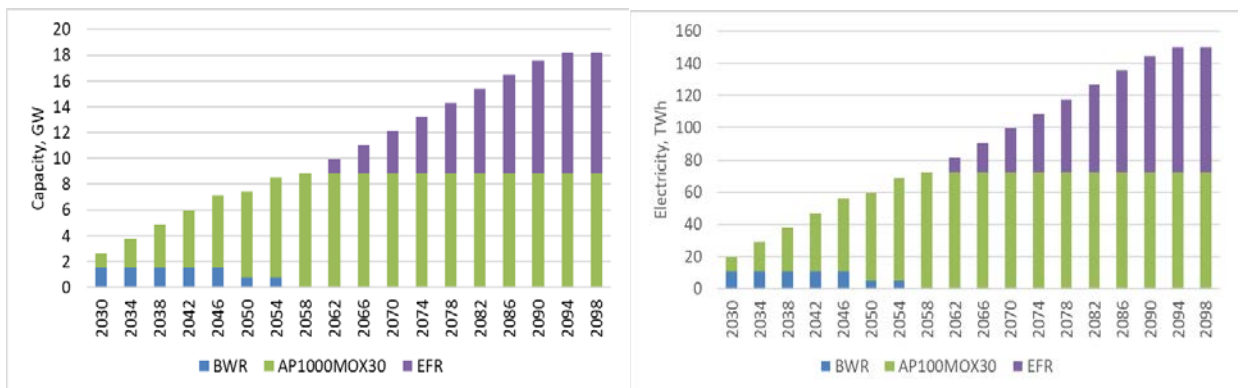


FIG. 21. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 4

E5

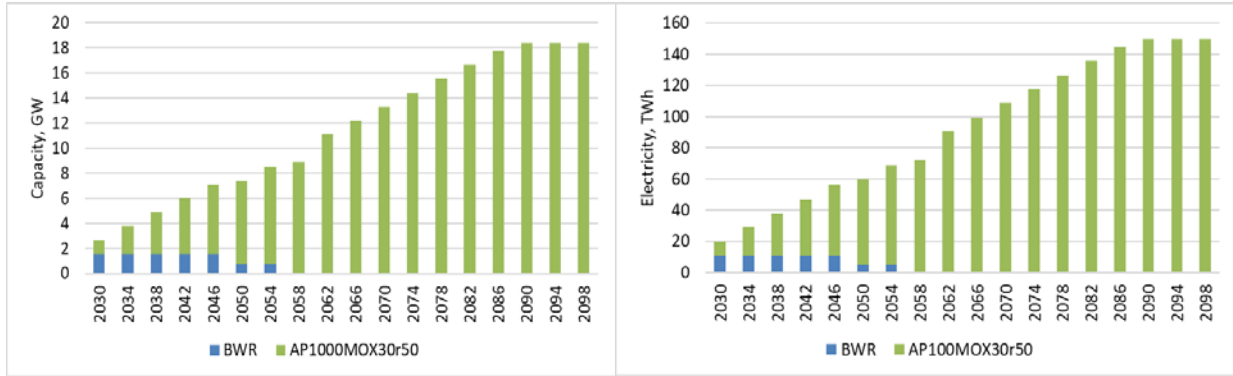


FIG. 22. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 5

E6

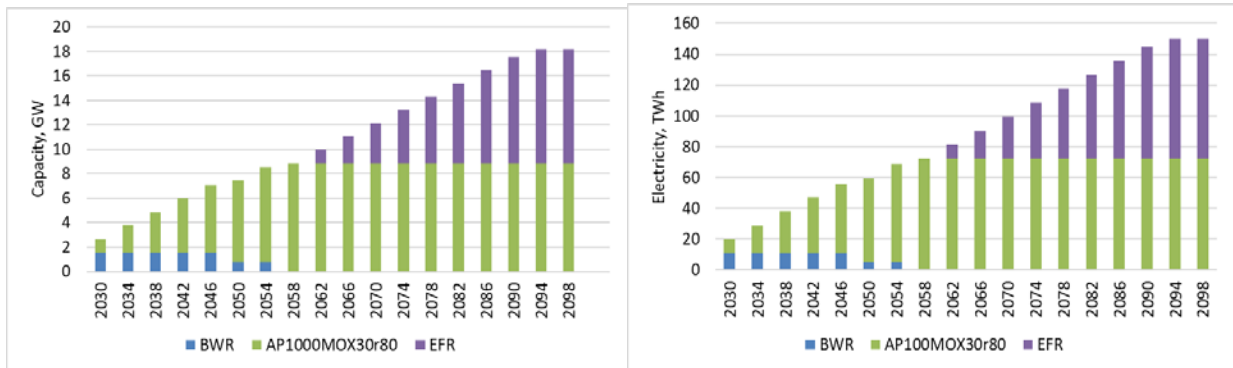


FIG. 23. CAPACIDAD INSTALADA Y GENERACION TOTAL ESCENARIO 6

Un análisis comparativo de las NES a nivel de escenario se centra en mayor medida en cómo evaluar la eficacia de las NES en términos de utilización eficiente del uranio natural, las capacidades de NFC y la tasa de acumulación de materiales fisionables secundarios y desechos radiactivos para la escala dada de producción de energía. En este contexto, es conveniente operar con flujos de material nuclear en la NFC (cantidad integral en el tiempo, las necesidades anuales, etc.). Los KI preferidos son

aquellos que caracterizan la cantidad integral de un flujo de material particular durante un período de tiempo determinado.

Los diagramas de flujo de las figuras 28, 29 y 30 representan el flujo anual de materiales nucleares para 2100 calculado por las simulaciones NFCSS para los escenarios NES-1 a NES-6. Todos los sistemas de energía nuclear producen 150,000 GWh para el año 2100. Como se observa en la figura 28, el escenario E1 demanda la mayor cantidad de uranio natural (2706.9 t) dado que es un escenario que considera reactores tipo AP1000 que utilizan UO_2 en un ciclo de combustible abierto de un solo paso.

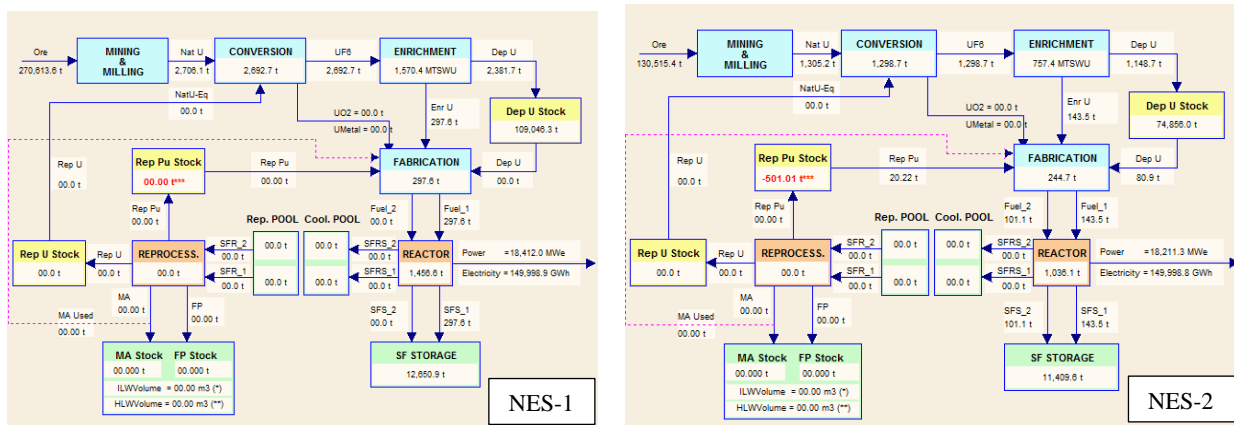


FIG. 24. DIAGRAMA DE FLUJO DE MATERIALES PARA NES-1 Y NES-2

Se obtuvo una disminución de las demandas de recursos naturales y del stock de combustible nuclear gastado en el escenario NES 2, siendo 1305.2 t y 11409.6 t respectivamente (ver figura 28), por lo que, como se ha explicado anteriormente, el NES 2 propone la incorporación de reactores rápidos (EFR) y reactores AP1000.

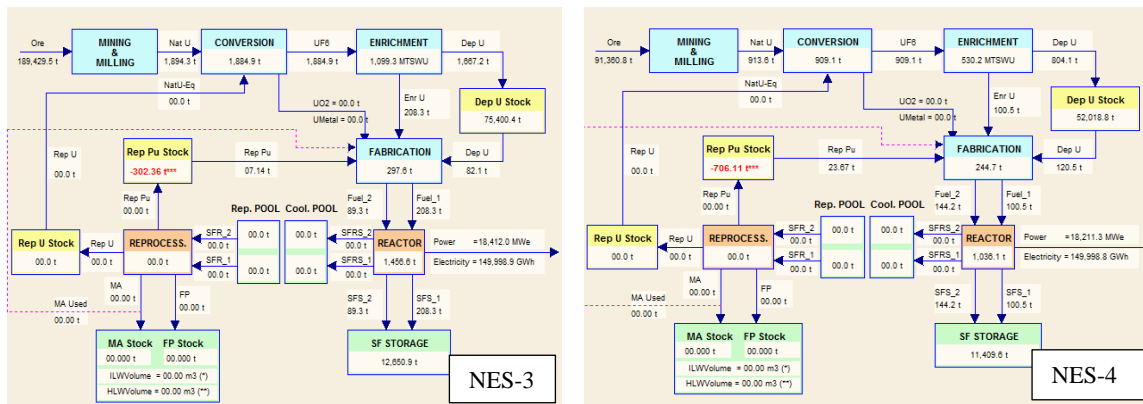


FIG. 25. DIAGRAMA DE FLUJO DE MATERIALES PARA NES-3 Y NES-4

El diagrama de flujo de materiales nucleares y producción de energía para NES-3 se muestra en la figura 29. Este escenario se construyó con reactores AP1000 que utilizan un 30 % de combustible MOX. En comparación con NES-2, las reservas de uranio empobrecido, el combustible gastado y los requisitos de uranio natural muestran valores más altos, lo que destaca una mejor utilización de los recursos de uranio natural y plutonio reprocesado en los EFR. Con la configuración realizada en el NES-4 se consigue una mejora sustancial en el ciclo del combustible nuclear. Se consigue que valores como la demanda anual de uranio natural disminuyan por debajo de las 1,000 toneladas. Este escenario considera reactores AP1000 operando con 30% de combustible MOX y reactores rápidos. Así, el stock de uranio rep empobrecido se reduce significativamente a 52,018.8 t debido a su uso en la fabricación de combustible MOX.

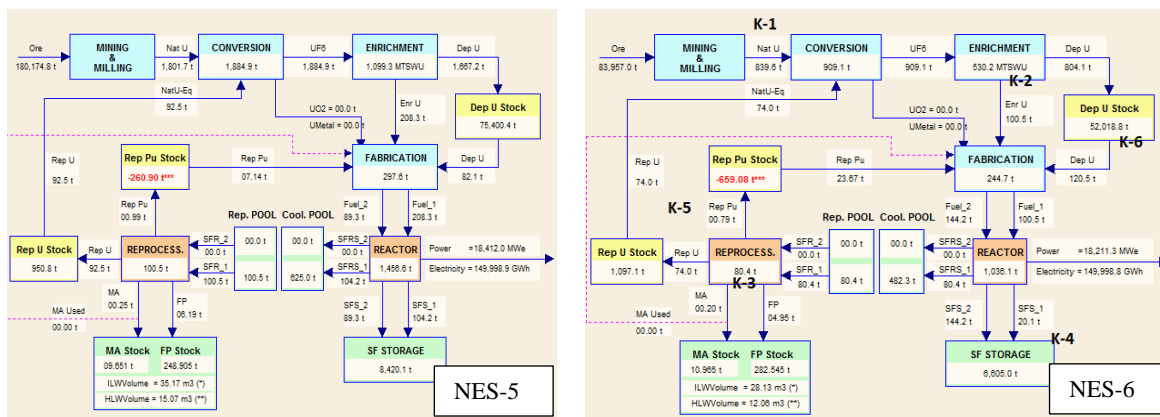


FIG. 26. DIAGRAMA DE FLUJO DE MATERIALES PARA NES-5 Y NES-6

El escenario NES-5 destaca por reducir el stock de combustible gastado a 8420,1 t (ver figura 30), debido a que el reprocesamiento de combustible nuclear supuso un 50% del total de combustible vertido en los LWR, pero, al ser un escenario que sólo considera reactores del tipo AP1000, observamos altas demandas sobre los recursos naturales de uranio, lo que significa que esta alternativa es menos recomendable. La figura 30 muestra un resumen del ciclo del combustible nuclear para el escenario NES-6 en el año 2100, que incluye reactores AP1000 que utilizan combustible tipo MOX, reactores rápidos y reprocesamiento del combustible descargado de los LWR. Los k-indicadores K-1 a K-6 están asociados al parámetro del ciclo del combustible nuclear que están cuantificando. K-1 para consumo de uranio natural, K-2 Unidades de trabajo separativas requeridas, K-3 Requisito de reprocesamiento, K-4 Existencias de combustible gastado, K-5 Existencias de plutonio reprocesado y K-6 Existencias de uranio empobrecido.

5.1.2 Single-attribute value functions vs indicator y Single-attribute value functions.

En el estudio presentado, se utilizó la herramienta KIND-ET para obtener una tabla con las funciones de valor de atributo único frente al indicador. Esta tabla se obtuvo mediante una normalización lineal utilizando un dominio local de funciones de valor. Las figuras 31 y 32 muestran los gráficos con las funciones de valor de atributo único obtenidas con la tabla correspondiente. Ambos gráficos muestran que NES-1 y NES-2 tienen una calificación baja en comparación con otros. La misma conclusión se confirma en el gráfico de la figura 33, donde las barras muestran la función de valor de atributo múltiple para los pesos base. Estos resultados son importantes para la toma de decisiones sobre el despliegue de la energía nuclear en un país, ya que muestran la evaluación de la viabilidad técnica, económica y social de cada alternativa.

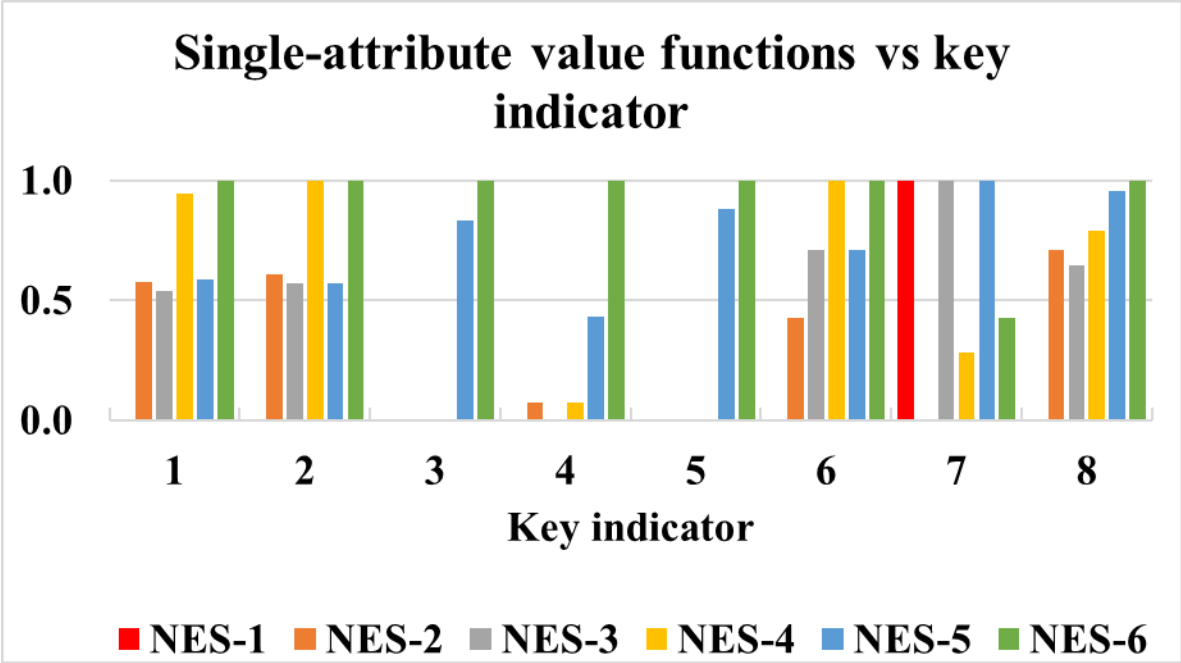


FIG. 27. SINGLE-ATTRIBUTE VALUE FUNCTIONS VS INDICATOR

Single-attribute Value Functions vs Indicator

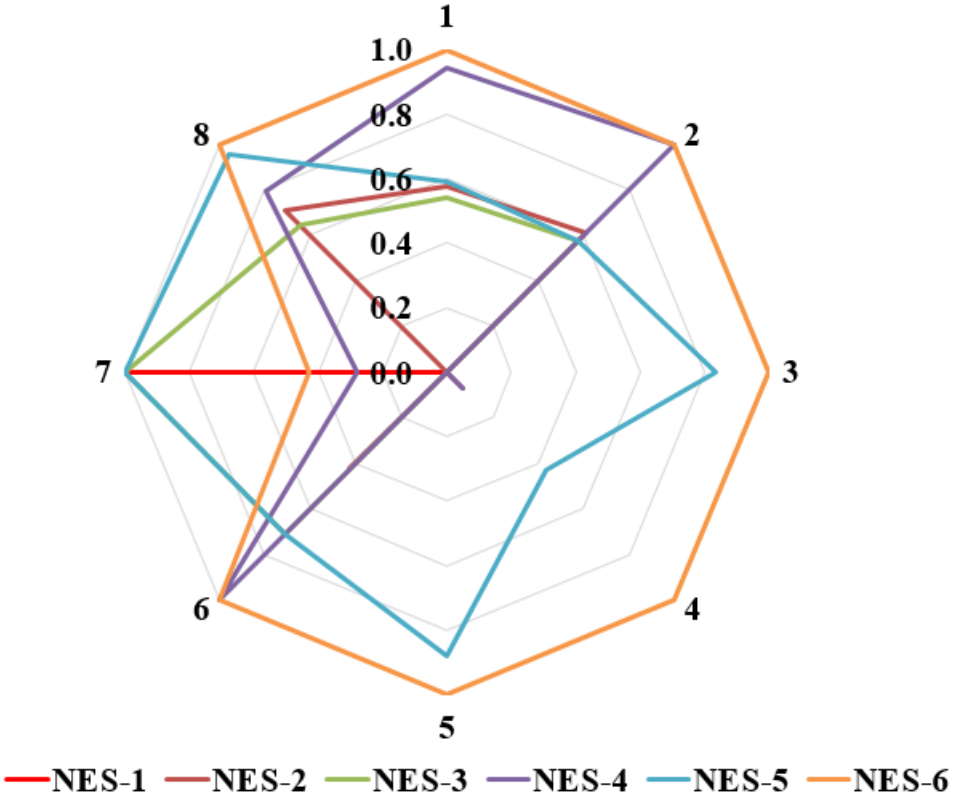


FIG. 28. SINGLE-ATTRIBUTE VALUE FUNCTIONS

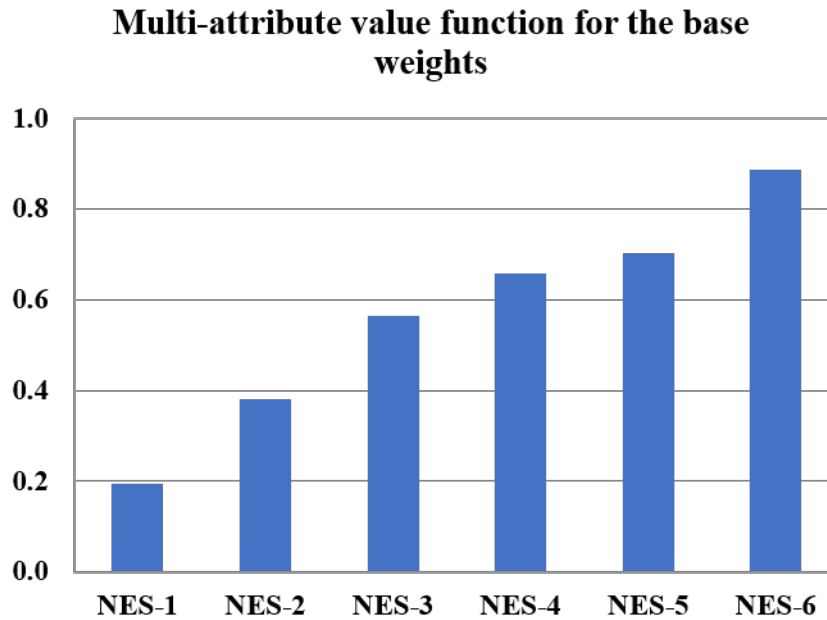


FIG. 29. CLASIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA LOS PESOS BASE.

5.1.3 High-level objectives scores for the base weights y areas scores for the base weights

En el contexto de este estudio, las figuras 34 y 35 son de gran utilidad para los tomadores de decisiones, ya que permiten identificar la contribución de los objetivos y áreas al puntaje general. Las figuras proporcionan una visión clara de cómo se distribuye el puntaje entre los diferentes objetivos y áreas

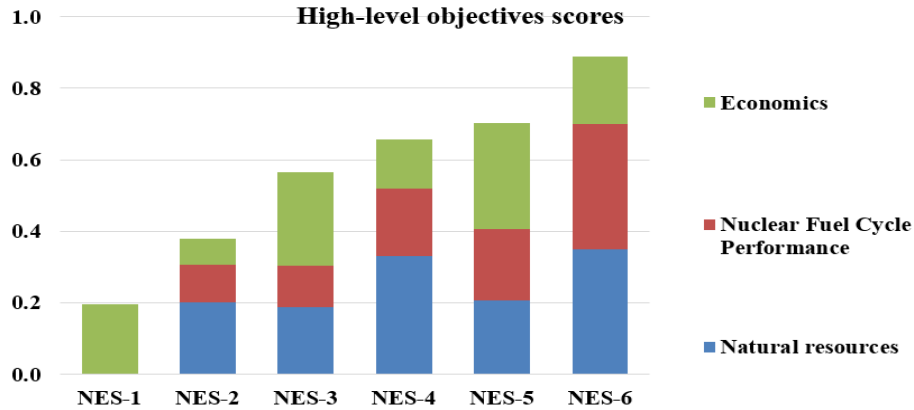


FIG. 30. PUNTUACIONES DE OBJETIVOS DE ALTO NIVEL PARA LAS PONDERACIONES BASE

Las figuras 34 y 35 presentan de manera visual y detallada la influencia de cada una de las áreas y objetivos de alto nivel en cada uno de los escenarios evaluados. Estas figuras son de gran ayuda para los tomadores de decisiones, ya que les permiten identificar fácilmente los aspectos más importantes a considerar en el proceso de evaluación y les brindan información valiosa para la toma de decisiones informadas.

La figura 34 muestra la influencia de cada una de las áreas de alto nivel en los diferentes escenarios evaluados. Cada área se representa mediante un color distinto, lo que facilita la identificación visual de la influencia de cada área en los escenarios. Asimismo, se presentan los valores de influencia de cada área en cada uno de los escenarios, lo que permite comparar y evaluar su impacto de manera más detallada.

Por otro lado, la figura 35 presenta la influencia de cada uno de los objetivos de alto nivel en los diferentes escenarios evaluados. Al igual que en la figura 34, cada objetivo se representa mediante un color distinto, lo que facilita la identificación visual de la influencia de cada uno en los escenarios. Asimismo, se presentan los valores de influencia de cada objetivo en cada uno de los escenarios, lo que permite comparar y evaluar su impacto de manera más detallada.

En conjunto, estas dos figuras permiten a los tomadores de decisiones identificar los aspectos más importantes en el proceso de evaluación y tomar decisiones informadas basadas en los resultados obtenidos. De esta manera, se asegura que las decisiones tomadas sean adecuadas y se logren los objetivos deseados.

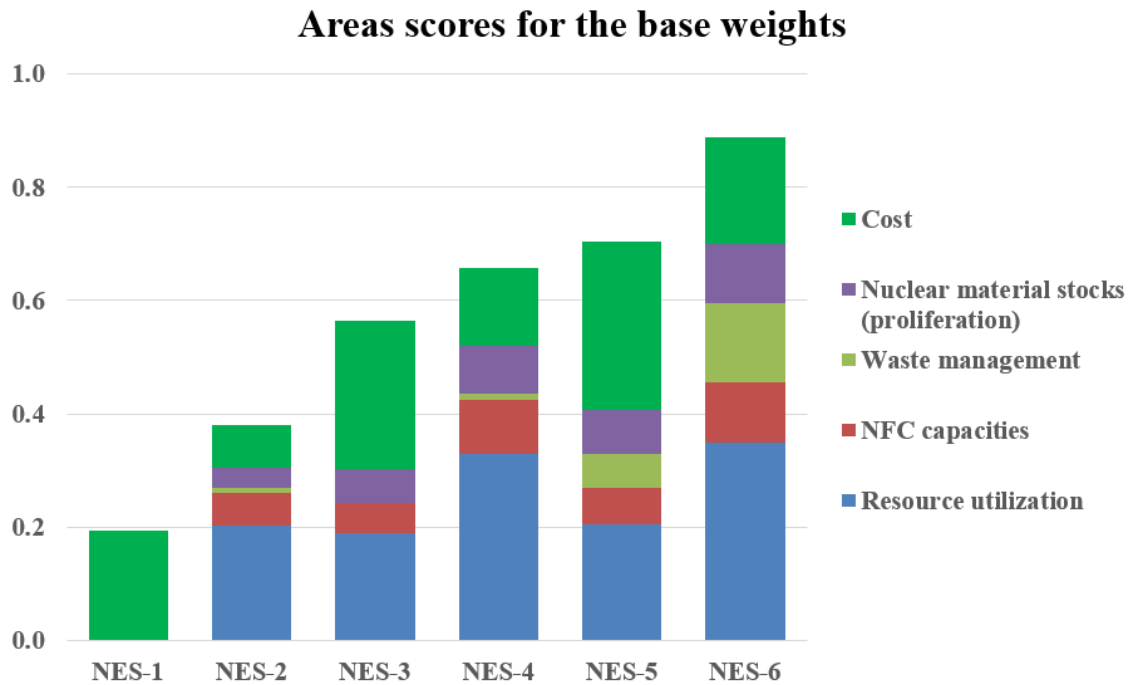


FIG. 31. PUNTAJES DE LAS ÁREAS PARA LOS PESOS BASE

5.1.4 Ranking results for weights sensitivity.

En el enfoque KIND, otro aspecto implementado es realizar un análisis de sensibilidad de los pesos. En el presente estudio de caso, se aplicaron dos conjuntos de pesos modificados con valores que se muestran en la figura 36, a saber: caso modificado 1: 50% para los HLO de Recursos naturales, 30% para los HLO de

Desempeño de NFC y 20% para los HLO de Economía; caso modificado 2: 20% para los HLO de Recursos naturales, 40% para los HLO de Desempeño de NFC y 40% para los HLO de Economía. Los resultados de clasificación de los NES se muestran en la figura 37 comparando los impactos en la clasificación de ambos pesos modificados con los pesos base. La conclusión obtenida es que el NES-6 es el mejor para los tres pesos.

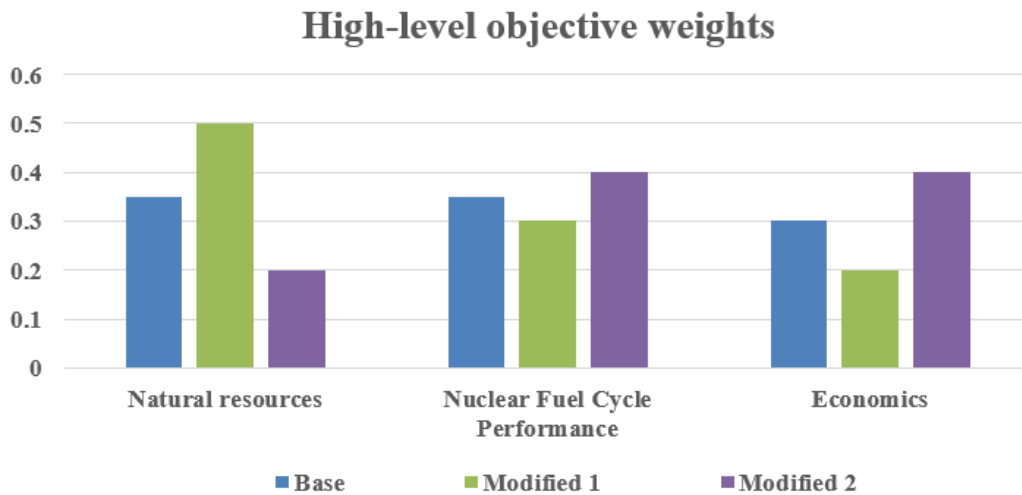


FIG. 32. PONDERACIONES DE OBJETIVOS DE ALTO NIVEL.

El análisis de sensibilidad de los pesos en KIND es importante para comprender cómo la elección de diferentes pesos puede afectar los resultados de la evaluación. Al aplicar diferentes conjuntos de pesos modificados, los responsables de la toma de decisiones pueden evaluar cómo cambiar la importancia relativa de diferentes objetivos y áreas puede afectar el rendimiento relativo de diferentes alternativas. Esto puede ser útil para identificar la importancia de diferentes criterios en la selección de alternativas y ayudar a tomar decisiones informadas. Además, el análisis de sensibilidad también puede ayudar a identificar soluciones robustas que sean consistentes en diferentes escenarios de peso.

Ranking results and weights sensitivity

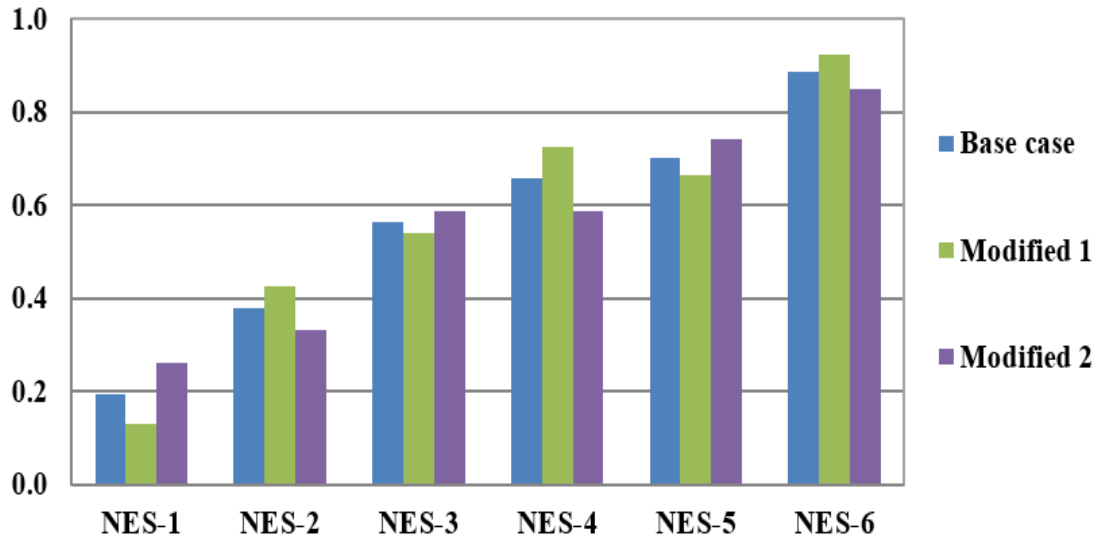


FIG. 33. CLASIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA LA SENSIBILIDAD DE LOS PESOS.

5.1.4 Resultados para la sensibilidad de la función de valor

El análisis de sensibilidad de la función de valor se realizó considerando un cambio en el costo de inversión del EFR, de 3500 a 4000 US \$ / kW, en los datos de entrada de los cálculos de MESSAGE. Como resultado, la función de valor de un solo atributo de KI-7 cambió para los NES-2, NES-4 y NES-6, como se muestra en la tabla 12. Estos valores de K1-7 se utilizaron junto con los otros siete indicadores clave invariables para generar los resultados de clasificación correspondientes de NES en el "caso modificado de K1-7". Se realizó otro análisis de sensibilidad de la función de valor utilizando las reglas heurísticas de KIND-ET; los resultados se presentaron en el "caso modificado de KIND-ET". Los resultados de clasificación para el análisis de sensibilidad de la función de valor de los dos casos modificados se compararon con el caso base en la figura 38.

TABLA 12. SENSIBILIDAD DE LA FUNCIÓN VALOR EN INDICADOR “KI-7 LUAC+LUOM”

	Value Function change	KI-7 LUAC+LUOM [US\$/kWyr]					
Case	EFR investment cost US\$/kW(e)	NES-1	NES-2	NES-3	NES-4	NES-5	NES-6
Base	3500	324.4	348.15	324.4	341.49	324.4	338.0
KI-7 modified	4000	324.4	362.33	324.4	354.67	324.4	352.36

El análisis de sensibilidad de la función de valor es una técnica utilizada para evaluar el impacto de los cambios en los parámetros en el resultado final. En este caso, se evaluó cómo el cambio en el costo de inversión del EFR afecta la clasificación de los NES. Los resultados muestran que el cambio en el costo de inversión del EFR afecta la clasificación de los NES-2, NES-4 y NES-6, lo que sugiere que este parámetro es importante en la evaluación de los NES. Además, el uso de las reglas heurísticas de KIND-ET también afectó la clasificación de los NES, lo que destaca la importancia de la elección del enfoque de evaluación. La comparación de los resultados del análisis de sensibilidad con el caso base proporciona información valiosa para los tomadores de decisiones al identificar los parámetros críticos y sus impactos en la evaluación global de los NES.

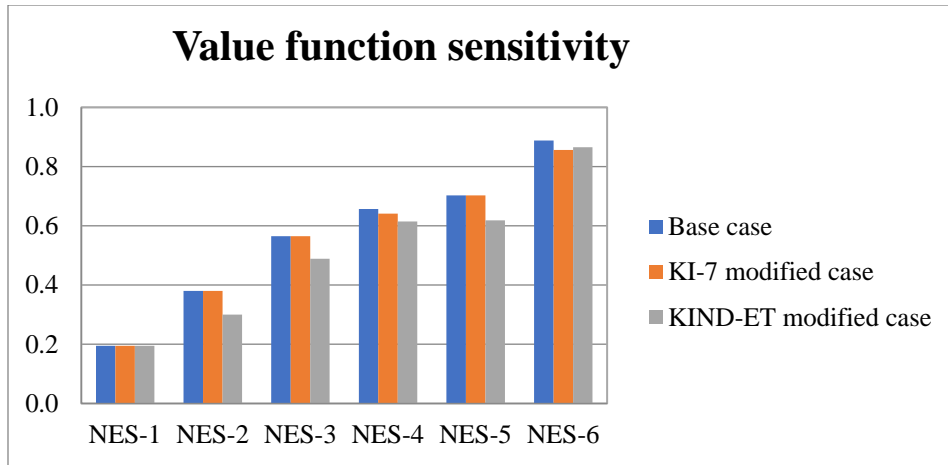


FIG. 34. CLASIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA LA SENSIBILIDAD DE LA FUNCIÓN DE VALOR.

5.1.5 Domination identifier results

La elaboración de una gráfica de identificación de dominancia es una herramienta complementaria en el análisis. Esta gráfica utiliza los valores de la tabla de rendimiento como entrada y, a través de las reglas heurísticas, ayuda a identificar qué NES domina a los demás en cada indicador clave. La figura 39 muestra la gráfica de identificación de dominancia.

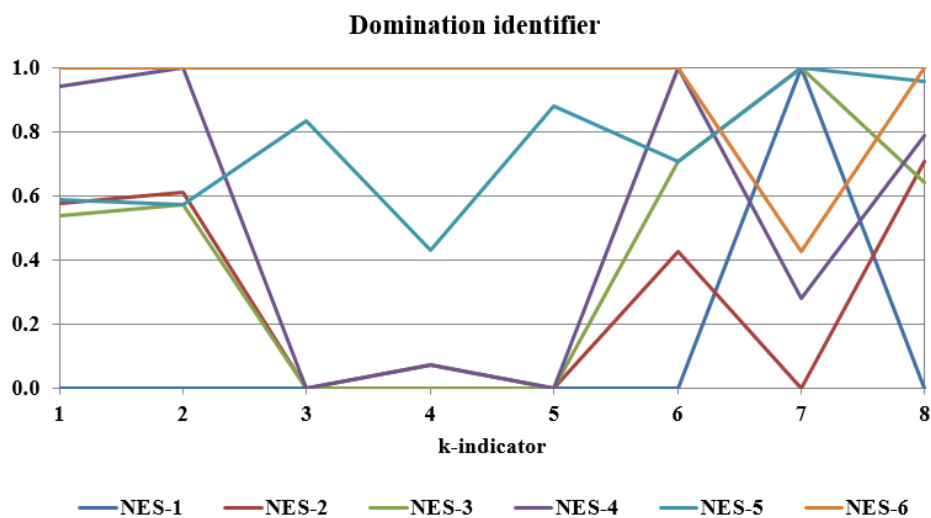


FIG. 35. RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN DE DOMINANCIA.

Otra herramienta útil para los tomadores de decisiones es analizar el gráfico de opción dominante. La entrada para obtenerlo son también los valores de la tabla de rendimiento. La tabla 40 muestra los resultados. Se puede observar que NES-1 es dominado por NES-3 y NES-5; NES-2 es dominado por NES-4 y NES-6; NES-3 es dominado por NES-5; NES-4 es dominado por NES-6; NES-5 y NES-6 no son dominados por otros. Estos resultados son importantes para los tomadores de decisiones, ya que les permiten enfocar su atención en las opciones dominantes y descartar aquellas que son claramente inferiores.

Domination table		Dominating options					
		NES-1	NES-2	NES-3	NES-4	NES-5	NES-6
Dominated options	NES-1		-	<	-	<	-
	NES-2	-		-	<	-	<
	NES-3	-	-		-	<	-
	NES-4	-	-	-		-	<
	NES-5	-	-	-	-		-
	NES-6	-	-	-	-	-	

FIG. 36. TABLA DE OPCIONES DOMINANTES.

5.1.6 Overall Score Spread Builder

La incertidumbre es una consideración crítica en la toma de decisiones y, por lo tanto, es esencial que se aborden adecuadamente en el análisis de evaluación de sistemas energéticos. Por lo tanto, el tratamiento avanzado de la incertidumbre es una parte integral del enfoque KIND, y se utilizan herramientas relevantes desarrolladas dentro del proyecto colaborativo CENESO para abordar la incertidumbre en los factores de ponderación y las funciones de valor de un solo atributo. La Tabla 13 presenta los resultados de las características estadísticas de las distribuciones probabilísticas del análisis global de incertidumbre con respecto

a los pesos (*Overall Score Spread Builder*), que proporcionan una idea clara de la incertidumbre en los pesos asignados a cada factor en el análisis.

TABLA 13. DISTRIBUCIONES PROBABILÍSTICAS.

	NES-1	NES-2	NES-3	NES-4	NES-5	NES-6
Mean	0.15656	0.30032	0.46752	0.47213	0.76768	0.84760
Standart deviation (SD)	0.25138	0.19783	0.23735	0.29642	0.12372	0.23831
Maximum value (Max)	0.99849	0.70677	0.99871	0.99988	0.99979	1.00000
Quartile (Q3, 75%)	0.20590	0.46003	0.62677	0.74069	0.86492	0.99781
Median	0.01924	0.29099	0.50867	0.47170	0.77645	0.97565
Quartile (Q1, 25%)	0.00114	0.11890	0.28597	0.19114	0.68086	0.79760
Minimum value (Min)	0.00000	0.00000	0.00006	0.00004	0.42656	0.05316

Por otro lado, la figura 41 muestra los resultados de los puntajes resultantes cuando todos los pesos son inciertos, lo que permite una evaluación detallada de los resultados de la evaluación de sistemas energéticos en términos de su sensibilidad a la incertidumbre. Este tipo de análisis ayuda a los tomadores de decisiones a comprender mejor los riesgos asociados con la elección de una determinada NES y a tomar decisiones informadas y precisas.

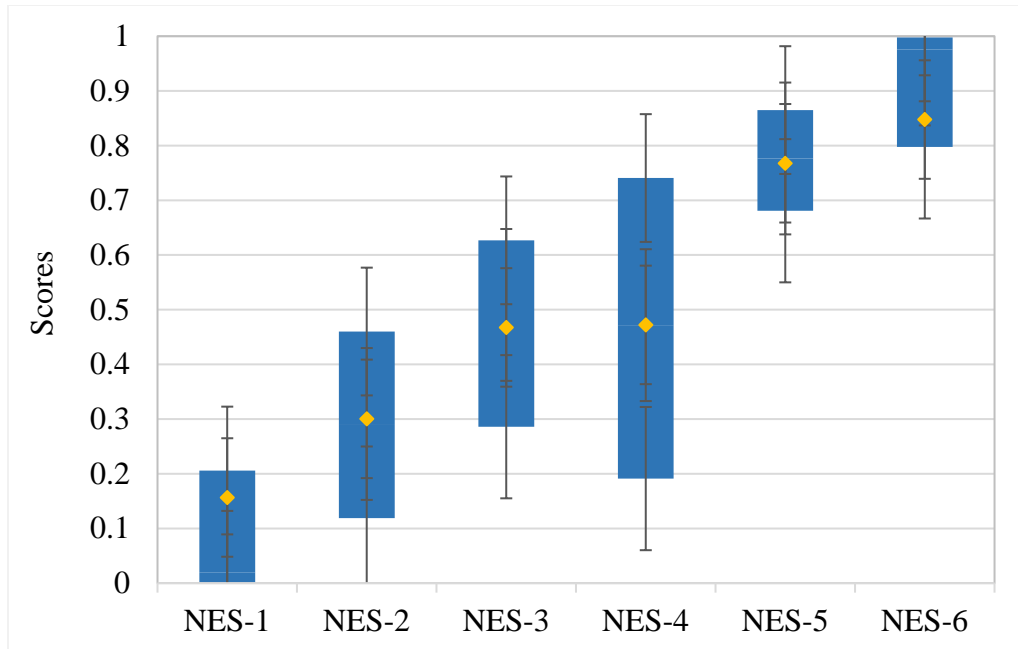


FIG. 37. OVERALL SCORE SPREAD BUILDER.

5.1.7 Ranks mapping tool

El *Ranks Mapping Tool*, herramienta que se utilizó para crear el mapa de preferencias que indica las áreas en el espacio de los pesos de objetivos de alto nivel en las que la opción correspondiente puede ocupar el primer lugar en la clasificación (ver Figura. 42). En la Figura 43 se presentan las puntuaciones generales máximas para todas las opciones de NES.

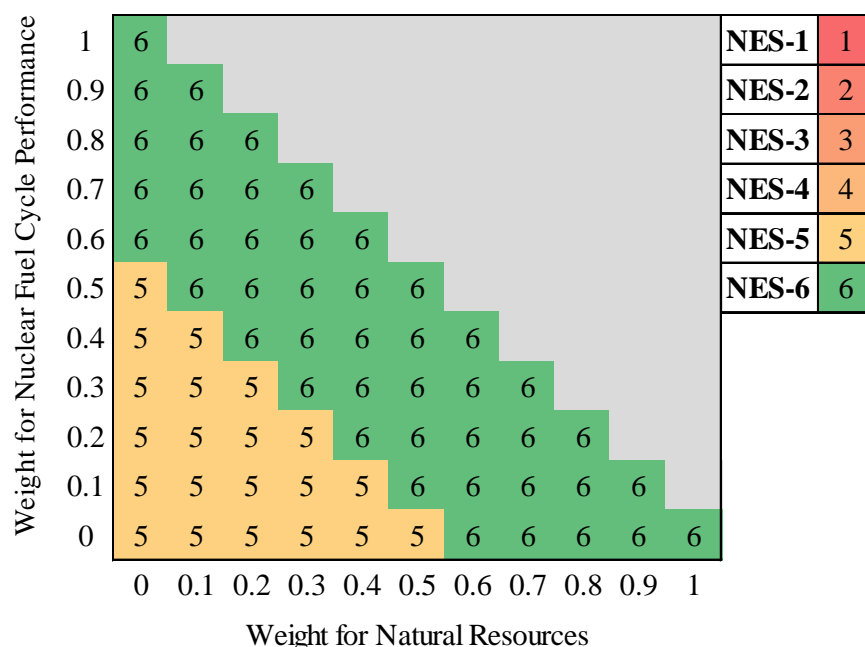


FIG. 38. OPCIONES DE NES CON EL PRIMER RANGO.

El mapa de preferencias es una herramienta muy útil para los tomadores de decisiones, ya que les permite identificar rápidamente las áreas de mayor prioridad en las que se debe enfocar la atención. En la Figura 42 se puede observar que el NES-6 cobra la mayor relevancia cuando se da mayor peso a los recursos naturales y al ciclo del combustible nuclear.

La Figura 43, por otro lado, muestra las puntuaciones generales máximas para todas las opciones de NES. Es interesante observar que la opción NES-6 tiene la puntuación general máxima, lo que indica que es la opción más adecuada en términos de cumplimiento de los objetivos establecidos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que todas las opciones tienen puntuaciones generales cercanas, lo que indica que todas ellas son opciones viables y pueden satisfacer las necesidades de energía del país.

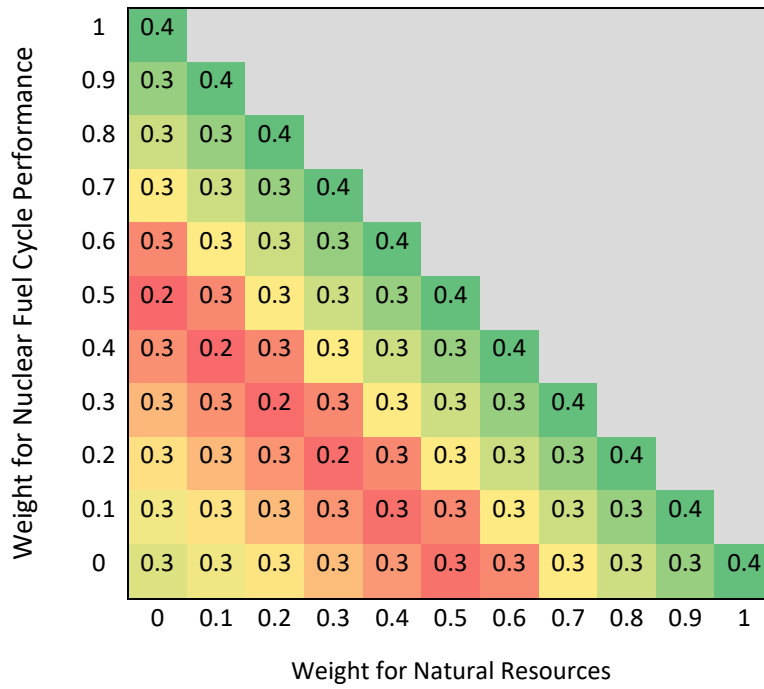


FIG. 39. PUNTUACIONES GENERALES MÁXIMAS PARA TODAS LAS OPCIONES DE NES.

5.2. ETAPA B

FRONT END Y BACK END DE LOS ESCENARIOS

Durante el análisis realizado en el marco de esta investigación, y extendiendo el alcance de la etapa A, se evaluaron diferentes escenarios partiendo con el FRONT-END y BACK-END del ciclo del combustible nuclear, utilizando la herramienta NFCSS. Para llevar a cabo esta evaluación, se seleccionaron cuidadosamente una serie de variables de interés, las cuales fueron empleadas posteriormente en la generación de criterios para la toma de decisiones utilizando la metodología KIND-ET. Los resultados obtenidos en esta evaluación permitieron identificar una serie de patrones y tendencias importantes en el comportamiento del ciclo del combustible nuclear, así como en el desempeño de los diferentes escenarios evaluados. Al considerar estas variables y patrones en el contexto de la metodología KIND-ET, se logró generar una serie de criterios de decisión robustos y fundamentados en datos, los cuales resultan de gran utilidad para los tomadores de decisiones en el campo de la energía nuclear.

Entre las variables de interés evaluadas se incluyen aspectos como el costo del combustible, la cantidad de desechos generados, la eficiencia en la generación de energía eléctrica, la cantidad de energía generada y la cantidad de combustible utilizado. A partir de estas variables, se pudieron identificar diferentes escenarios que presentan ventajas y desventajas específicas en términos de costo, eficiencia y seguridad.

En resumen, los resultados obtenidos en esta evaluación permiten tener una mejor comprensión de las complejas interacciones y compensaciones (*trade-offs*) que existen en el ciclo del combustible nuclear. Asimismo, estos resultados pueden ser empleados para desarrollar estrategias y políticas públicas que permitan aprovechar al máximo los beneficios de la energía nuclear, al tiempo que se minimizan sus posibles riesgos y desventajas.

A continuación, se presentan resultados para los escenarios evaluados en lo que respecta al FRONT-END y BACK-END empleando la herramienta NFCSS. Se exponen las variables de interés, mismas que fueron usadas en los futuros aspectos de comparación y generación de criterios en la toma de decisión bajo la metodología de KIND-ET.

5.2.1 DEMANDA Y CAPACIDAD PROYECTADA.

Los resultados presentados en las figuras 44 y 45 permiten visualizar de manera clara la capacidad instalada y la energía generada por las diferentes tecnologías consideradas en los trece escenarios evaluados. Destacando que todos los escenarios producen la misma cantidad anual de electricidad, lo que sugiere que se han logrado equilibrar adecuadamente las fuentes de generación y la demanda proyectada.

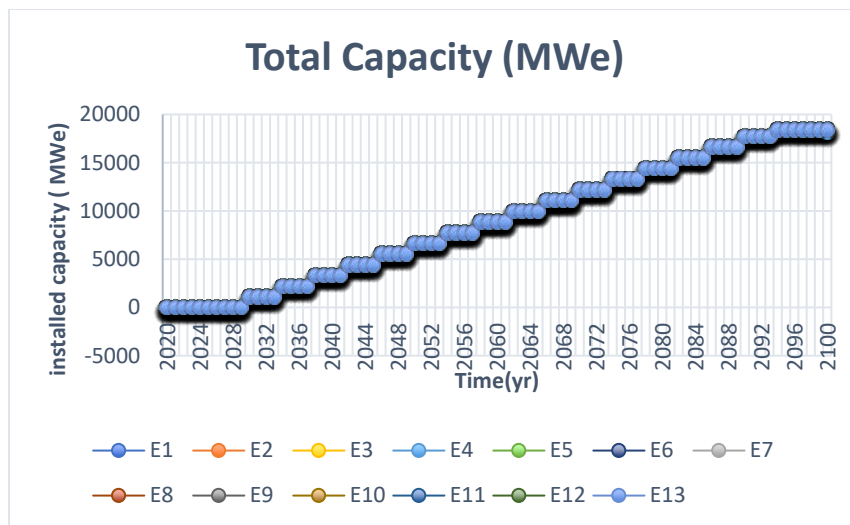


FIG. 40. CAPACIDAD INSTALADA TOTAL

Además, al observar la cantidad acumulada de electricidad generada durante el período de 2030 a 2100, se puede apreciar que alcanza un valor cercano a los 5,969 TWh, lo que sugiere que los escenarios propuestos permiten cumplir con los objetivos de generación de energía a largo plazo. Estos resultados pueden ser de gran utilidad para los tomadores de decisiones, ya que les permiten tener una idea

clara de las capacidades de generación y la energía producida por cada tecnología y escenario, lo que les permite tomar decisiones informadas y bien fundamentadas.

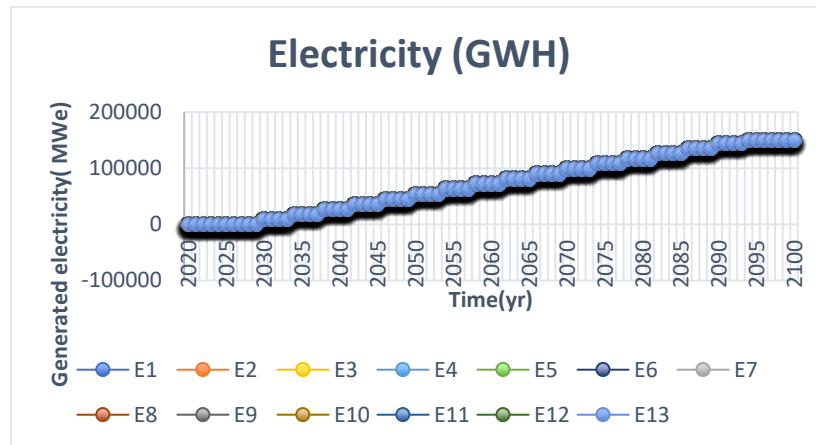


FIG. 41. ENERGÍA TOTAL GENERADA

5.2.2 RECURSOS NATURALES CONSUMIDOS

La figura 46 muestra el consumo anual de uranio natural para 2100 calculado por las simulaciones NFCSS, para las trece propuestas de tecnologías nucleares. Se observa que, de las tecnologías planteadas, alcanzan las mayores demandas de uranio natural los escenarios E10, E12, E1, E13 correspondientes a las etiquetas; PWR-PU-TH, ABWR-PU-TH Ap1000-UOX, y PHWR, disminuyendo las demandas de uranio natural por año, en la medida en que incrementa el uso de combustible tipo MOX (figura 46).

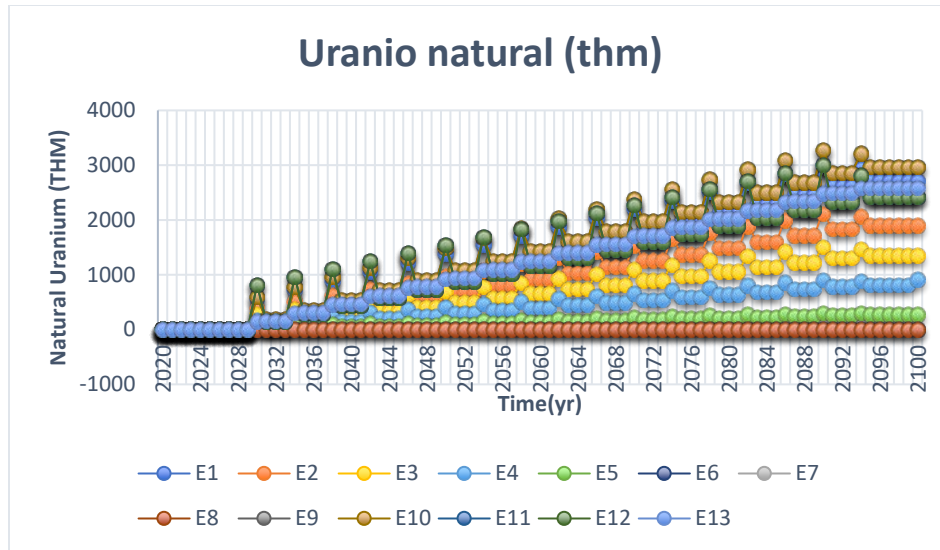


FIG. 42. CONSUMO ANUAL DE URANIO NATURAL

5.2.3 PLUTONIO PROCESADO EMPLEADO ANUALMENTE

Las necesidades de plutonio a emplear en dichos escenarios se muestra en la figura 47, donde el escenario que mayores demandas de plutonio exige es el E8 (EFR), seguido de E6, E5, E4, E3, E2 respectivamente.

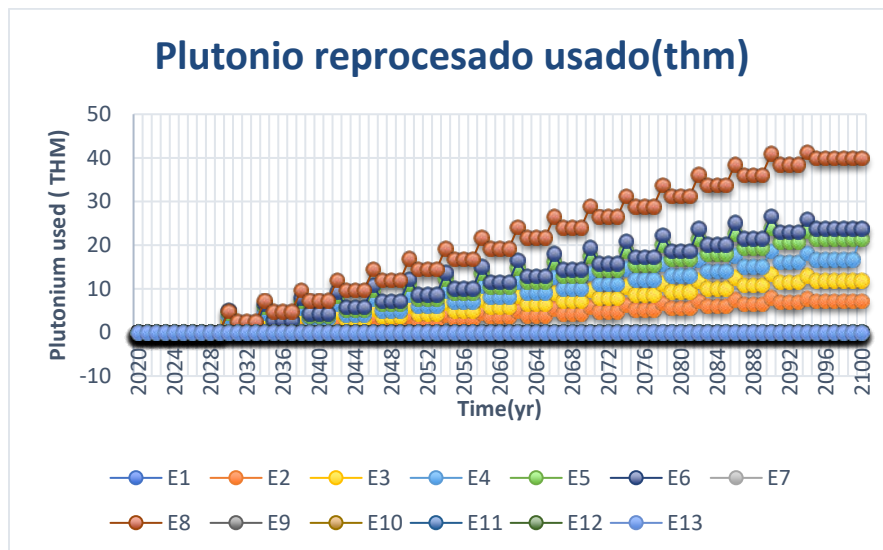


FIG. 43. PLUTONIO PROCESADO EMPLEADO ANUALMENTE

El aumento en la producción de energía nuclear con reactores rápidos también trae consigo un aumento en la demanda de plutonio para ser utilizado en los diferentes escenarios. La figura 47 ilustra claramente esta situación, donde se muestra que el escenario que requiere una mayor cantidad de plutonio es el E8. Este aumento en la demanda de plutonio puede plantear preocupaciones en cuanto a la seguridad y la gestión adecuada de los materiales nucleares, lo que subraya la importancia de un enfoque cuidadoso y responsable en la planificación y ejecución de los programas de energía nuclear. Además, es necesario considerar el impacto ambiental y social de la minería y el procesamiento de plutonio, así como los costos asociados para satisfacer la demanda de estos escenarios de energía nuclear.

5.2.4 COMPARATIVA DE DESECHOS NUCLEARES ACUMULADOS.

El acumulado de uranio empobrecido generado producto del ciclo de combustible nuclear asociado a cada una de las tecnologías que hipotéticamente suplen la demanda planteada, se muestra en la figura 48, donde se observa la menor acumulación en los escenarios que despliegan reactores rápidos y reactores con combustible tipo MOX, además del PHWR debido al empleo de uranio natural por parte de este tipo de tecnologías.

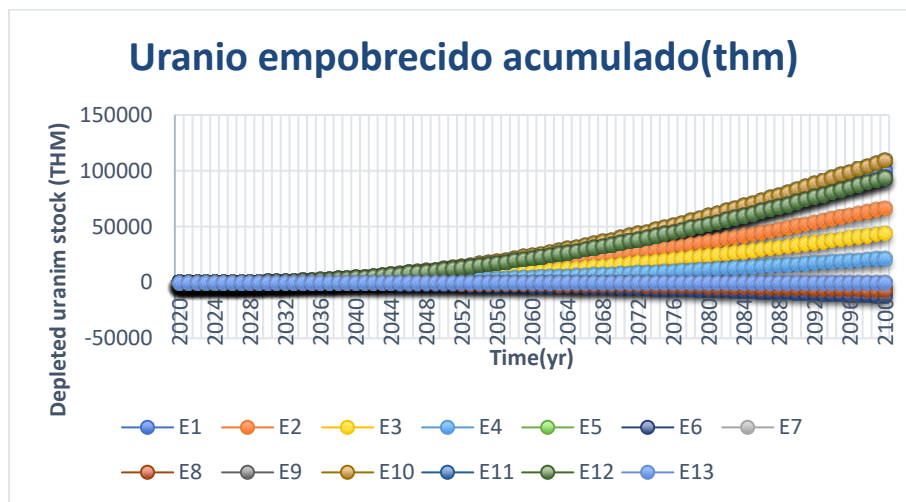


FIG. 44. URANIO EMPOBRECIDO ACUMULADO

La acumulación de uranio empobrecido es un subproducto del proceso de enriquecimiento de uranio que se utiliza en la fabricación de combustible nuclear. En la figura 48, se puede apreciar que los escenarios que emplean reactores rápidos y reactores con combustible tipo MOX presentan una menor acumulación de uranio empobrecido en comparación con los demás escenarios. Esto se debe a que estos tipos de reactores reutilizan el uranio y otros elementos como combustible, lo que reduce la cantidad de uranio empobrecido generado en el proceso de enriquecimiento. Además, los PHWR también presentan una baja acumulación de uranio empobrecido debido al uso de uranio natural como combustible.

Por otro lado, los escenarios que emplean reactores de agua ligera (LWR) y reactores de agua pesada (HWR) presentan una mayor acumulación de uranio empobrecido. Dado que estos reactores utilizan uranio enriquecido como combustible, lo que aumenta la cantidad de uranio empobrecido generado en el proceso de enriquecimiento. Es importante tener en cuenta que la acumulación de uranio empobrecido puede generar preocupaciones ambientales debido a que este material puede ser tóxico y radiactivo. Por lo tanto, la reducción en la acumulación de este subproducto en si mismo es un aspecto relevante para considerar en la selección de la tecnología nuclear a utilizar y favorable para las tecnologías de reactores rápidos.

5.2.5 SENSIBILIDAD DE LOS CICLOS DE COMBUSTIBLE, CONSIDERANDO REPROCESADO DE COMBUSTIBLE

Las toneladas de uranio empobrecido empleadas en la fabricación de combustible tipo MOX, para las diferentes configuraciones de MOX al 30, 50, 70, 90, y 100 % y para la tecnología de tipo EFR se muestra en la figura 49. Mostrando un comportamiento similar, las demandas para EFR y los reactores Ap1000 al 50% de combustible MOX y requiriendo las mayores demandas los reactores Ap1000 al 100% de combustible MOX.

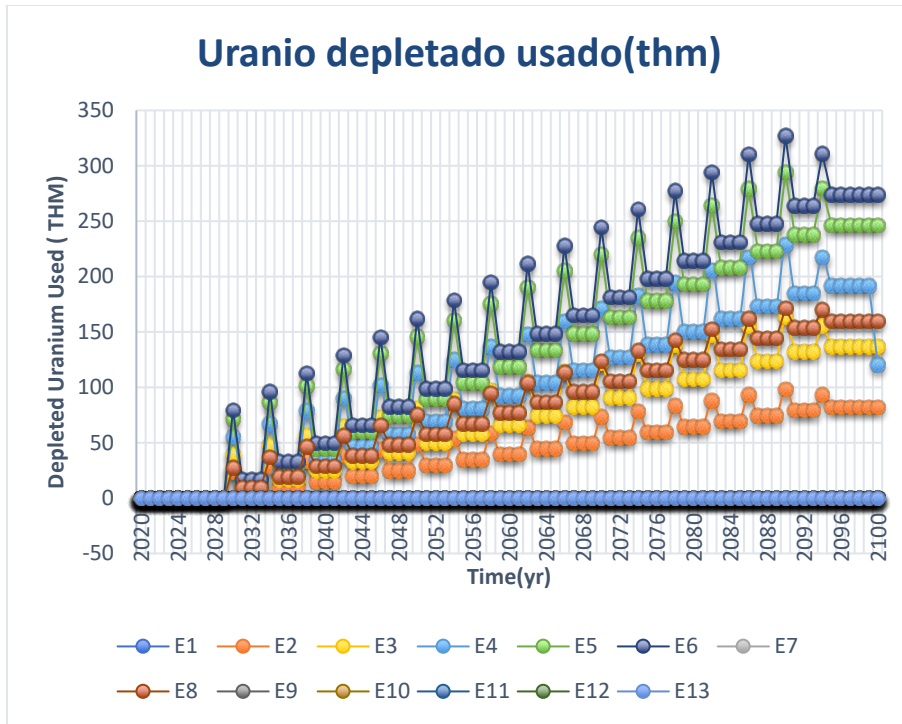


FIG. 45. URANIO EMPOBRECIDO EMPLEADO EN MOX

5.2.6 ACUMULADO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR GASTADO

El comportamiento del acumulado de combustible nuclear gastado, para las tecnologías planteadas se muestra en la figura 50, oscila entre las 8,000 y 12,400 toneladas de combustible gastado a finales del periodo considerado, ver figura 50.a), por su parte la figura 50. b) incluye el reactor de tipo PHWR el cual presenta diferencias de grandes magnitudes con respecto al resto de las tecnologías.

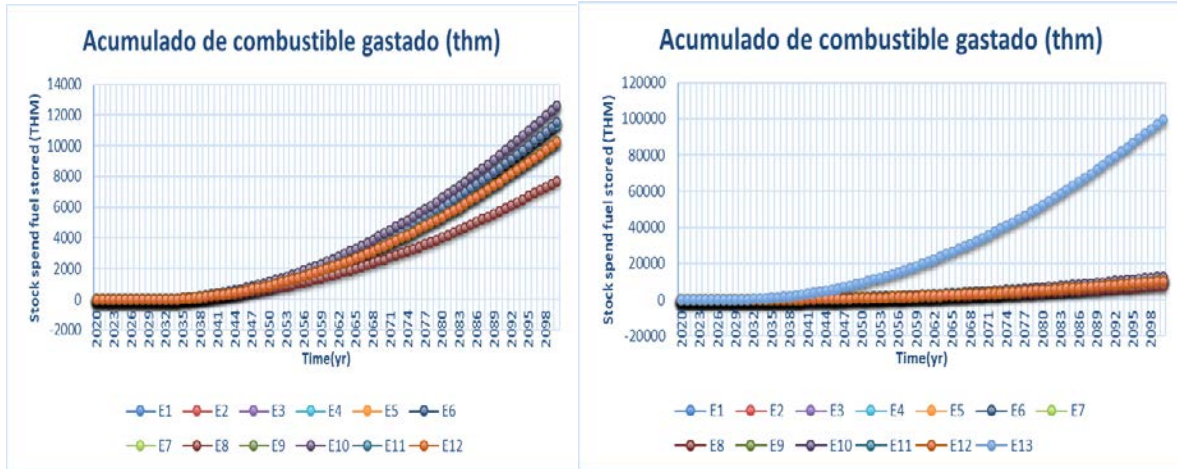


FIG. 46. ACUMULADO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR GASTADO.

CONCLUSIONES

La metodología y herramientas de la IAEA-INPRO permitieron evaluar escenarios de energía nuclear desde una perspectiva integrada y sostenible, teniendo en cuenta aspectos económicos, sociales, ambientales y tecnológicos. En este sentido, la evaluación realizada en esta investigación ha permitido identificar los diferentes escenarios de energía nuclear que podrían ser viables para México, teniendo en cuenta las particularidades del país y sus necesidades energéticas en el supuesto de una expansión nuclear e incorporación de reactores nucleares rápidos. La evaluación realizada en este estudio ha demostrado que existen diferentes alternativas para la implementación de la energía nuclear en México, y que cada una de ellas tiene ventajas y desventajas en términos de sostenibilidad y costos. Por un lado, los escenarios que involucran tecnologías de reactores rápidos, y el reprocesamiento del combustible nuclear, tienen la ventaja de aprovechar al máximo los recursos energéticos y reducir la generación de residuos radiactivos a largo plazo. Sin embargo, estas tecnologías también tienen un costo asociado más alto que otras alternativas más conservadoras. Por otro lado, los escenarios que involucran tecnologías de reactores de agua ligera y combustible MOX tienen la ventaja de ser menos costosos y más sencillos de implementar, pero a costa de una menor eficiencia energética y una mayor generación de residuos radiactivos a largo plazo. Por lo tanto, la elección de una alternativa u otra dependerá de los objetivos de sostenibilidad y costos que se quieran alcanzar en el largo plazo. En resumen, la evaluación realizada en esta tesis demuestra la importancia de llevar a cabo una evaluación integral y sostenible de los escenarios de energía nuclear en México, para poder tomar decisiones informadas que permitan alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible del país. Además, se destaca la importancia de considerar los costos asociados a cada alternativa, y de definir los aspectos que tendrán mayor importancia en la toma de decisiones en este ámbito. Quedando establecida una metodología la cual, con incorporaciones y mejoras, puede servir como base de partida para evaluaciones futuras donde se hayan aterrizado y fijado objetivos realistas en la expansión nuclear del país.

Referencias

- [1] IAEA-TECDOC-1575, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, vol.1, 2008.
- [2] IAEA-TECDOC-1639, Collaborative project 'in-depth analysis of scenarios involving fast reactors to support multi-recycling of plutonium in light water reactors and fast reactors' (FAST FORWARD)., 2010.
- [3] Secretaría de Energía., *PRODESEN 2021–2035. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional*, CDMX, 2021.
- [4] Averchenkova A. and Guzman Luna S, *Mexico's General Law on Climate*, 2018.
- [5] «INTERNATIONAL ENERGY AGENCY,» 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary>.
- [6] SENER, «PRODESEN.Programa de desarrollo del sistema electrico nacional,» 2018.
- [7] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION , «<https://world-nuclear.org/>,» [En línea]. Disponible: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/mexico.aspx>. [Último acceso: 2023].
- [8] Secretaría de Energía, « PRODESEN 2018–2032. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, CDMX.,» 2018.
- [9] IDOM, «CONSULTING ENGINEERING ARCHITECTURE,» 2018.
- [10] IAEA, «Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE A User's Guide,» 2016.
- [11] Jin Whan Bae, Kathryn Huff, Clifford Singer, «Synergistic Spent Nuclear Fuel Dynamics Within the European Union.,» *Transactions of the American Nuclear Society*, Vols. 1 de 2, Vol. 117, Washington, D.C, 2017.
- [12] David Freynet, Christine Coquelet-Pascal, Romain Eschbach, Guillaume Krivtchik, and Elsa Merle-Lucotte., «Multiobjective optimization for nuclear fleet evolution scenarios» *EPJ Nuclear Sci. Technol.* Volume 2, 2016. <https://doi.org/10.1051/epjn/e2015-50066-7>.
- [13] Z. Z. F. Fiori, «Sustainability of the Chinese nuclear expansion: The role of ADS to,» *EL SEVIER*, pp. 123-134, 2015.
- [14] R. Plukienė, A. Plukis, L. Juodis, V. Remeikis, O. Šalkauskas, D. Ridikas, W. Gudowski, «Transmutation considerations of LWR and RBMK spent nuclear fuel by the,» *ELSEVIER*, pp. 241-249, 2018.
- [15] IAEA-TECDOC-1259, «Nuclear power planning: An integrated approach,» Vienna, Austria, 2021.
- [16] IAEA No. NP-T-1.14, «Framework for assessing dynamic nuclear energy systems for sustainability: FINAL Report of the INPRO Collaborative Project GAINS,» Viena, 2013.
- [17] IAEA No. NF-T-4.9, «Enhancing benefits of nuclear energy technology innovation through cooperation among countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project SYNERGIES,» Viena, 2018.

- [18] IAEA, «Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS),» 2011.
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), «Application of multi-criteria decision analysis methods to comparative evaluation of nuclear energy system options: final report of the inpro collaborative project kind, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.20,,» 2019.
- [20] Kuznetsov V, Fesenko G, Andrianov A, Kuptsov I, «INPRO activities on development of advanced tools to support judgment aggregation for comparative evaluation of nuclear energy systems. Sci Technol Nucl Installat,» 2015.
- [21] Groudev PP, Zaharieva NN, Margeanu CA, Constantin M., «Comparison of innovative and evolutionary NPPs in a country specific context for Bulgaria (Based on IAEA INPRO KIND –ET Methodology),» 2017.
- [22] IAEA No. NG-T-3.20, «Application of multi-criteria decision analysis methods to comparative evaluation of nuclear energy system options: final report of the INPRO collaborative project kind,» Viena, 2019.
- [23] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, «USER INSTRUCTIONS FOR KIND-ET (KIND-EVALUATION TOOL),» 2017.