



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA TRANSICIÓN
ENERGÉTICA SOSTENIBLE**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA

M.C. EDGAR GEOVANNI MORA JACOBO

ASESOR

Dr. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

CO-ASESOR:

Dr. JAVIER TOVAR FACIO

MORELIA, MICHOACÁN.

Marzo 2025.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA SOSTENIBLE.

Por: M.C. Edgar Giovanni Mora Jacobo

Resumen

Este proyecto se centra en el desarrollo e implementación de un modelo matemático para optimizar el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de México, con el objetivo principal de mitigar el cambio climático y promover un sistema energético más sostenible. El modelo, implementado en el software GAMS y utilizando datos detallados de EcoInvent sobre el ciclo de vida de las diferentes tecnologías energéticas, considera una variedad de restricciones técnicas (capacidades de generación y transmisión, factores de eficiencia), económicas (costos de inversión, operación y mantenimiento) y ambientales (factores de emisión, uso de recursos). Se exploran diversos escenarios futuros con diferentes combinaciones de tecnologías renovables (solar, eólica, biomasa, hidroeléctrica), evaluando el impacto de la expansión de la capacidad de transmisión, la interconexión regional y la adopción de redes inteligentes. Los resultados del modelo incluyen la identificación de soluciones óptimas para minimizar el costo total anual, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de agua, además de analizar la participación de diferentes tecnologías y regiones de control en la generación de energía. Este trabajo proporciona una herramienta cuantitativa valiosa para evaluar el desempeño de los sistemas energéticos en términos de sostenibilidad y viabilidad técnica, promoviendo una transición energética baja en carbono en México.

Palabras Clave: Modelo Matemático; Optimización; Sistema Eléctrico Nacional (SEN); Mitigación Cambio Climático; Energías Renovables.

Abstract

This project tackles the urgent requirement for transitioning to low-carbon energy in Mexico by creating and applying a mathematical model designed to optimize the National Electric System (SEN). Developed using GAMS and integrating comprehensive life-cycle data from EcoInvent, the model considers multiple technical, economic, and environmental factors. The model evaluates the impact of transmission capacity expansion, regional interconnection, and smart grid adoption by exploring various future scenarios with diverse renewable energy mixes (solar, wind, biomass, hydro). The results identify optimal solutions for minimizing total annual cost, greenhouse gas emissions, and water consumption while also analyzing the role of different technologies and control regions in energy generation. This research presents a vital quantitative framework to evaluate energy systems' sustainability and technical viability, leading to improved decision-making for a cleaner energy future in Mexico.

Keywords: Mathematical Model; Optimization; National Electric System (SEN); Climate Change Mitigation; Eco-Indicator.

Contenido

1.	Introducción	11
1.1	Transición energética.....	11
1.2	Perspectiva global de la transición energética	12
1.3	Innovación tecnológica	14
1.4	Las redes inteligentes como facilitadoras de la transición energética.....	14
1.5	Almacenamiento de energía y su impacto en la eficiencia	15
1.6	Redes inteligentes	15
1.7	Electrificación.....	17
1.8	Implicaciones económicas y sociales en la transición energética.....	19
1.9	Beneficios sociales: calidad de vida y justicia social.....	20
1.10	Avances en la transición energética global.....	21
1.11	Aumento en la capacidad de energías renovables	22
1.12	Impactos socioeconómicos del crecimiento renovable	22
1.13	Desarrollos tecnológicos.....	23
1.14	Colaboración internacional y financiamiento.....	23
1.15	El caso de México: desafíos y oportunidades.....	26
1.16	Objetivos de la investigación.....	28
1.17	Contribuciones de la investigación.....	30
2	Antecedentes	33
2.1	Planificación estratégica	33
2.1.1	Definición de planificación estratégica en el sector energético.....	33
2.1.2	Evolución histórica de la planificación estratégica en el sector.....	34
2.1.3	Principales enfoques teóricos y metodológicos utilizados	34
2.1.4	Retos y tendencias actuales	35

2.2	Indicadores ambientales	36
2.2.1	Definición y clasificación de indicadores ambientales	36
2.2.2	Relevancia de los indicadores ambientales en el sector energético	37
2.2.3	Indicadores ambientales para evaluar impactos en el sector energético ..	38
2.3	Análisis de sostenibilidad	39
2.3.1	El concepto de sostenibilidad en el sector energético	39
2.3.2	Métodos más utilizados en el análisis de sostenibilidad	39
2.3.3	Estudios integradores de sostenibilidad económica, social y ambiental ..	40
2.3.4	Conexión con políticas globales y regionales	41
2.4	Enfoques integradores	41
2.4.1	Revisión de estudios integradores	42
2.4.2	Modelos y herramientas computacionales para enfoques integradores ..	42
2.4.3	Identificación de vacíos y áreas de mejora	43
2.5	Análisis de implementaciones en la transición energética	44
2.5.1	Estados unidos: políticas de impulso a las energías renovables	44
2.5.2	Alemania: mezcla de políticas y escenarios sociotécnicos	45
2.5.3	Japón: diseño de políticas y simulación para la transición.....	46
2.5.4	Otros casos relevantes: China y Noruega	46
2.5.5	Comparación de los casos de estudio	47
3	Metodología	47
3.1	Modelos matemáticos y herramientas computacionales.....	49
3.2	Herramientas computacionales.....	51
3.3	Fundamentos teóricos	55
3.3.1	Balance energético	56
3.3.2	Reducción de emisiones.....	57

3.3.3	Sostenibilidad	58
3.4	Herramientas y modelos	60
3.5	Propósito y objetivos del modelo	61
3.5.1	Descripción general del modelo.....	62
3.5.2	Elementos principales del modelo	62
3.5.3	Factores considerados.....	63
3.5.4	Implementación del modelo	63
3.5.5	Datos y herramientas complementarias.....	64
3.5.6	Características destacadas.....	64
3.5.7	Aplicaciones.....	65
4	Justificación	66
5	Caso de estudio	66
5.1	Interconexiones transfronterizas	67
5.2	Interconexiones con América del Norte	68
5.3	Interconexiones con Centroamérica	69
5.4	Regiones de transmisión.....	69
5.5	Capacidad de las líneas de transmisión	70
5.6	Demanda energética.....	71
5.7	Centrales eléctricas	72
5.8	Emisiones y consumo de agua	73
6	Formulación del modelo.....	73
6.1	Balance de generación de energía por región de control	74
6.2	Pérdidas de energía primaria debidas a la producción	75
6.3	Límite de energía exportada	76
6.4	Balance de la demanda de energía por región de control	76

6.5	Límites de la energía transmitida entre las regiones de control e importación por agentes externos	76
6.6	Generación de energía a partir de instalaciones generadoras.....	77
6.7	Límites para la energía generada por las instalaciones de generación	78
6.8	Capacidad de las instalaciones.....	78
6.9	Costo operativo de las instalaciones de generación existentes.....	78
6.10	Costo operativo de las instalaciones de nueva generación	79
6.11	Costo de capital para instalaciones de nueva generación	79
6.12	Costos de importación y transmisión de energía	79
6.13	Costos de instalación de nuevas líneas de transmisión.....	80
6.14	Costo anual total.....	80
6.15	Emisiones	81
6.16	Agua usada.....	81
6.17	Uso de suelo.....	82
6.18	Enfoque de múltiples partes interesadas	82
7	Resultados	83
7.1	Minimización de la función multiobjetivo (MSH).....	92
8	Conclusiones.....	99
9	Nomenclatura.....	102
9.1	Conjuntos.....	102
9.2	Parámetros	102
9.3	Variables.....	104
9.4	Variables binarias	106
10	REFERENCIAS.....	107

Figuras

Figura 1. Proyección de la demanda eléctrica nacional en GWh.	49
Figura 2. Comparación de emisiones entre tecnologías renovables y no renovables. .	51
Figura 3. Evolución de la participación de fuentes fósiles y renovables.	52
Figura 4. Participación de tecnologías renovables por año.	53
Figura 5. Pronóstico de crecimiento de la generación eléctrica, clasificado por el origen de la energía.	55
Figura 6. Esquema del balance energético en un sistema típico.	57
Figura 7. Impactos positivos y negativos de la adopción de energías renovables.	59
Figura 8. Esquema de herramientas para el análisis, modelado y optimización orientados a objetivos.	60
Figura 9. Límites del Sistema de Energía Eléctrica (regiones de control) y la demanda de energía eléctrica en cada región.	67
Figura 10. Capacidad de las líneas transfronterizas de transferencia de energía eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional y operadores.	68
Figura 11. Interacción entre regiones de control, capacidad de las líneas de transmisión de energía eléctrica existentes y nuevas del Sistema Eléctrico Nacional.	70
Figura 12. Demanda de energía eléctrica para 2020 y estimación de demanda de energía eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional para 2025 y 2030.	72
Figura 13. Representación gráfica del Sistema Eléctrico Nacional con interacciones (Superestructura).	74
Figura 14. Generación eléctrica mensual por región de control para el año 2020 con los objetivos de los escenarios A, B y C.	84
Figura 15. Participación y contribución de tecnologías en la generación de energía eléctrica en las regiones de control para los escenarios A, B y C.	85
Figura 16. Transmisión de energía eléctrica entre regiones de control y pérdidas de energía por transmisión del Sistema Eléctrico Nacional para los escenarios A, B y C.	86
Figura 17. Generación mensual de energía eléctrica en las regiones de control del Sistema Eléctrico para los escenarios D, E y F (2025).	87
Figura 18. Generación de energía eléctrica en cada región de control e importancia de las tecnologías en el Sistema Eléctrico para los escenarios D, E y F.	88

Figura 19. Transmisión de energía eléctrica entre regiones de control y pérdidas de energía por transmisión del Sistema Eléctrico Nacional para los escenarios D, E y F .	89
Figura 20. Distribución mensual de la generación eléctrica en las regiones de control del sistema eléctrico para el año 2030.....	90
Figura 21. Generación de electricidad para el año 2030 y participación de las tecnologías consideradas en cada región de control para los escenarios G, H e I.	91
Figura 22. Transmisión de energía eléctrica entre regiones de control y pérdidas de energía por transmisión del Sistema Eléctrico Nacional para los escenarios G, H e I. .	92
Figura 23. Generación de energía eléctrica por tecnología en cada región de control del sistema eléctrico para los escenarios J, K y L (enfoque multiobjetivo).	93
Figura 24. Distribución mensual de la generación de energía en las regiones de control, minimizando la función multiobjetivo.	94
Figura 25. Interacción, transmisión y pérdidas debidas a la transmisión de energía eléctrica en las regiones de control del sistema energético para los escenarios J, K y L.	95
Figura 26. Toneladas anuales de CO ₂ eq emitidas en cada uno de los escenarios propuestos, incluyendo el promedio anual actual.	96
Figura 27. Valores de función objetivo con punto nadir y utópico, para el sistema energético en los escenarios A, B, C y J.....	97
Figura 28. Valores de función objetivo con punto nadir y utópico, para el sistema energético en los escenarios D, E, F y K.	98
Figura 29. Valores de función objetiva con punto nadir y punto utópico, para el sistema energético en los escenarios G, H, I y L.....	98

Tablas

Tabla 1. Distribución mensual de la demanda eléctrica para 2020, 2025 y 2030.	71
Tabla 2. Comparación de los escenarios en el costo anual total, las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de agua por año.....	99

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, mi familia, amigos y compañeros por su apoyo incondicional, su amor y motivación para seguir adelante.

A mi asesor, por su confianza, apoyo, respaldo y aportación durante el proyecto de investigación.

A Conahcyt por su apoyo y aportación financiera.

1. Introducción

1.1 Transición energética

La transición energética representa uno de los desafíos más significativos y transformadores de nuestro tiempo, impulsada por la necesidad de mitigar los efectos del cambio climático, garantizar la seguridad energética y cumplir los compromisos internacionales en sostenibilidad (Østergaard et al., 2020). Este proceso implica un cambio paradigmático desde sistemas dependientes de combustibles fósiles hacia modelos basados en energías renovables y tecnologías limpias.

Desde la Revolución Industrial del siglo XIX, el carbón fue la principal fuente energética, alimentando el crecimiento de industrias y sistemas de transporte como el ferrocarril (Genc & Kosempel, 2023). Sin embargo, esta dependencia energética llevó a un aumento exponencial de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo al calentamiento global. En el siglo XX, el petróleo y el gas natural reemplazaron al carbón como principales fuentes energéticas, promoviendo una expansión económica global, aunque perpetuaron los desafíos medioambientales (Lu & Nemet, 2020).

Hoy en día, la transición energética busca reemplazar estos modelos obsoletos con sistemas más sostenibles basados en energías renovables como la solar, eólica y geotérmica, combinadas con avances en almacenamiento energético y redes inteligentes (Kovač et al., 2021). Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el sector energético es responsable del 73% de las emisiones globales de GEI, lo que lo sitúa en el centro de las estrategias climáticas globales (Shah, 2024).

El Acuerdo de París de 2015 marcó un hito en los esfuerzos globales para limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales. Europa ha liderado este esfuerzo con iniciativas como el Green Deal de la Unión Europea, que busca alcanzar la neutralidad climática para 2050. Este acuerdo promueve la electrificación de sectores industriales y de transporte, así como el desarrollo de tecnologías limpias (Adelekan et al., 2024).

En Alemania, la estrategia Energiewende ha logrado que más del 40% de su electricidad provenga de fuentes renovables. Asimismo, Dinamarca lidera en el uso de aerogeneradores offshore, como el parque Horns Rev 3, que genera 407 MW de energía eólica y abastece a más de 425,000 hogares al año (Rakhmatov et al., 2024). Sin embargo, estas políticas contrastan con los desafíos en regiones en desarrollo como América Latina y África, donde la falta de infraestructura adecuada y financiamiento retrasa la implementación de estas estrategias (Vakulchuk et al., 2020).

A nivel tecnológico, las redes inteligentes y las baterías de iones de litio están revolucionando la gestión de la energía, permitiendo una mayor integración de fuentes renovables y mejorando la estabilidad de los sistemas eléctricos (Zavadskas et al., 2022). Adicionalmente, el hidrógeno verde se posiciona como un componente clave en la transición energética global, especialmente para sectores industriales difíciles de electrificar (Chigarev, 2024).

Sin embargo, el éxito de esta transición no solo depende de los avances tecnológicos, sino también de la implementación de políticas públicas efectivas y colaboraciones internacionales que aborden las desigualdades en acceso a tecnologías y financiamiento (Weinand, 2020).

1.2 Perspectiva global de la transición energética

La transición energética global se ha convertido en una prioridad urgente para abordar los desafíos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad del suministro energético. Este proceso implica una transformación fundamental de los sistemas energéticos tradicionales hacia modelos más limpios y sostenibles. Sin embargo, su implementación ha avanzado de manera desigual entre las diferentes regiones del mundo, reflejando variaciones en recursos disponibles, capacidades tecnológicas y políticas públicas (Hafner & Tagliapietra, 2020b).

En Europa, los avances en la transición energética están profundamente vinculados a políticas ambiciosas como el Green Deal de la Unión Europea, que establece objetivos claros para lograr la neutralidad climática para 2050. Alemania, por ejemplo, ha liderado esta transición mediante su estrategia Energiewende, que ha reducido significativamente

la dependencia del carbón e incrementado la participación de fuentes renovables en su matriz energética (Genc & Kosempel, 2023). Dinamarca, otro ejemplo destacado, ha alcanzado más del 50% de su consumo eléctrico a partir de energía eólica, gracias a la integración de proyectos extraterritoriales (Bogdanov et al., 2021).

En Asia, China lidera la transición energética global no solo en términos de capacidad instalada, sino también en innovación tecnológica. Con más de 900 GW de capacidad renovable instalada en 2023, el país ha consolidado su posición como líder mundial en energía solar y eólica (Ram et al., 2020). Además, el plan "Made in China 2025" ha acelerado el desarrollo de tecnologías avanzadas de almacenamiento energético y vehículos eléctricos. Japón, en contraste, ha centrado su estrategia en la adopción del hidrógeno verde como un pilar para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como la industria pesada y el transporte marítimo (Lu & Nemet, 2020).

En América Latina, Brasil se posiciona como un líder regional con una matriz energética donde más del 80% de la electricidad proviene de fuentes renovables, especialmente hidroeléctricas. Sin embargo, esta dependencia presenta vulnerabilidades frente a eventos climáticos extremos. Chile, por otro lado, ha emergido como un referente en el desarrollo de energía solar y geotérmica, con políticas que incentivan la inversión privada y la diversificación de su matriz energética (Vural, 2021). México enfrenta desafíos significativos debido a la falta de estabilidad regulatoria y su alta dependencia de los combustibles fósiles.

En África, la transición energética es más lenta, pero hay iniciativas prometedoras. El proyecto Desertec, que busca aprovechar los vastos recursos solares del Sahara para generar electricidad tanto para África como para Europa, ha destacado el potencial de la región. Sudáfrica, mediante su programa REIPPPP, ha demostrado que los marcos regulatorios efectivos pueden atraer inversiones significativas en energías renovables, incluso en contextos de inestabilidad política (Sun et al., 2023).

A nivel global, los avances tecnológicos han sido fundamentales para superar los desafíos asociados con la transición energética. Las redes inteligentes han permitido la integración eficiente de fuentes intermitentes como la solar y la eólica, mejorando la estabilidad y resiliencia de los sistemas eléctricos (Alotaibi et al., 2020). Las baterías de

iones de litio han experimentado una reducción de costos del 87% en la última década, lo que las ha hecho viables para el almacenamiento de energía renovable y la electrificación del transporte (Kamath et al., 2020).

Además, tecnologías emergentes como la captura y almacenamiento de carbono están comenzando a complementar los esfuerzos globales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Omotoye et al., 2024).

Sin embargo, los desafíos persisten. La desigualdad en el acceso a tecnologías avanzadas y financiamiento sigue siendo una barrera importante, particularmente en los países en desarrollo. Según un informe del Banco Mundial, cerrar estas brechas requerirá más de 4 billones de dólares en inversiones anuales hasta 2050, con un enfoque en la transferencia de conocimientos técnicos y financiamiento internacional.

La cooperación internacional será esencial para garantizar que la transición energética sea inclusiva y sostenible. Los acuerdos multilaterales, las alianzas público-privadas y la participación de la sociedad civil serán fundamentales para superar los retos y garantizar un futuro energético más limpio y resiliente (Mistry, 2023).

1.3 Innovación tecnológica

La transición energética global está profundamente vinculada a los avances en tecnología y la implementación de redes inteligentes (redes inteligentes). Estas herramientas tecnológicas han transformado los sistemas energéticos tradicionales, permitiendo una mayor integración de energías renovables, la optimización del consumo energético y la mejora en la estabilidad de las redes eléctricas. Esta sección aborda el papel de las innovaciones tecnológicas y las redes inteligentes como pilares fundamentales en la transición energética.

1.4 Las redes inteligentes como facilitadoras de la transición energética

Las redes inteligentes son un elemento esencial para modernizar los sistemas eléctricos y facilitar la integración de fuentes de energía renovable. Estas redes utilizan tecnologías avanzadas de comunicación y sensores para optimizar el flujo de electricidad y mejorar la fiabilidad de los sistemas eléctricos (Yang, 2023). Además, las redes inteligentes

permiten el monitoreo en tiempo real y el mantenimiento predictivo, lo que reduce los costos operativos y mejora la eficiencia energética (Michael Olatunde et al., 2024).

1.5 Almacenamiento de energía y su impacto en la eficiencia

El almacenamiento energético es una tecnología clave para abordar la intermitencia de las energías renovables como la solar y la eólica. Las baterías de iones de litio, en particular, han experimentado una reducción significativa en costos, lo que las convierte en una solución viable para almacenar excedentes de energía renovable y redistribuirlos cuando la demanda es alta (Hercegová et al., 2021). Un diseño efectivo de los sistemas de almacenamiento debe equilibrar dos elementos clave: la capacidad de adaptarse a las fluctuaciones en la demanda y la eficiencia en la transformación de la energía. Estos factores son determinantes para que estos sistemas sean económicamente viables y funcionen correctamente (Allman & Daoutidis, 2017).

1.6 Redes inteligentes

Las redes inteligentes han revolucionado la gestión de los sistemas energéticos al integrar tecnologías avanzadas para optimizar la distribución y el consumo de energía. Estas redes facilitan la implementación de soluciones sostenibles mediante el uso de algoritmos avanzados, la integración de fuentes renovables y el fortalecimiento de la estabilidad del sistema. Al implementar métodos de optimización energética, las redes inteligentes pueden reducir significativamente las pérdidas de energía, los costos operativos y las emisiones de carbono (Jamshidi et al., 2024).

La integración de fuentes renovables en las redes inteligentes ha sido un componente esencial para abordar los desafíos de intermitencia y variabilidad inherentes a estas tecnologías. Modelos de optimización multiobjetivo permiten equilibrar costos operativos y emisiones contaminantes, al tiempo que maximizan la disponibilidad de energía renovable (Ullah et al., 2021).

Además, las redes inteligentes están integrando tecnologías de almacenamiento avanzadas y sistemas de control en tiempo real que permiten una mayor flexibilidad en la gestión de recursos energéticos distribuidos. Estas estrategias no solo mejoran la

eficiencia energética, sino que también optimizan la estabilidad de las microredes, reduciendo las fluctuaciones de voltaje y las pérdidas de transmisión (Rezaeimosafar et al., 2020).

La implementación de metodologías basadas en algoritmos avanzados, como la optimización por enjambre de partículas y la lógica difusa, ha demostrado ser eficaz para manejar la complejidad de las redes inteligentes. Estas técnicas permiten la integración óptima de recursos energéticos distribuidos y sistemas de almacenamiento en baterías (Naceur et al., 2024).

A nivel industrial, las redes inteligentes han implementado estrategias avanzadas de gestión de la demanda que permiten ajustar dinámicamente la carga en respuesta a las condiciones de la red y los costos de energía. Estas prácticas han reducido la dependencia de fuentes fósiles y han maximizado el uso de recursos renovables (Shreenidhi et al., 2024).

Finalmente, las redes inteligentes han demostrado ser una solución eficaz para integrar vehículos eléctricos en los sistemas energéticos, promoviendo su uso como sistemas de almacenamiento móvil que pueden alimentar la red durante los picos de demanda. Esto no solo mejora la estabilidad del sistema, sino que también fomenta una mayor adopción de tecnologías sostenibles (Achnib & Amghar, 2023).

A pesar de sus beneficios, la implementación de redes inteligentes enfrenta desafíos significativos. Entre ellos, los altos costos iniciales, la falta de interoperabilidad entre sistemas y las preocupaciones por la privacidad de los datos son barreras que limitan su adopción masiva (Vakulenko et al., 2021). Estos obstáculos requieren un enfoque integral que combine innovación tecnológica con políticas públicas efectivas.

Proyectos como el Brooklyn Microgrid en los Estados Unidos y la estrategia Energiewende en Alemania son ejemplos destacados de cómo las redes inteligentes pueden mejorar la resiliencia y eficiencia de los sistemas eléctricos (Uzundu & Lele, 2024). Estos proyectos han demostrado cómo las redes inteligentes pueden integrar eficazmente las energías renovables, reduciendo las emisiones de carbono y empoderando a los consumidores.

En los países en desarrollo, las redes inteligentes ofrecen una oportunidad única para superar las limitaciones de infraestructura y mejorar el acceso a la electricidad. Sin embargo, su implementación requiere modelos de financiamiento innovadores y la colaboración entre gobiernos, empresas privadas y organismos internacionales (Somepalli, 2024).

Las tendencias emergentes como el uso de blockchain para la gestión de energía descentralizada y las aplicaciones de inteligencia artificial para optimizar el almacenamiento de energía apuntan hacia un futuro prometedor para las redes inteligentes. Estas tecnologías tienen el potencial de transformar los sistemas eléctricos globales, haciéndolos más eficientes, sostenibles y accesibles (Onu et al., 2023).

1.7 Electrificación

La electrificación de sectores clave, como el transporte y la industria, es fundamental para alcanzar los objetivos globales de sostenibilidad y mitigar los efectos del cambio climático. Este proceso implica una transición hacia sistemas energéticos basados en electricidad renovable, lo que no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sino que también transforma radicalmente las dinámicas económicas y sociales. En esta sección, se analiza el impacto de la electrificación en el transporte y la industria, destacando los desafíos y oportunidades que plantea este cambio transformador.

El transporte representa una de las principales fuentes de emisiones de GEI a nivel mundial. En 2023, el sector contribuyó con aproximadamente el 25% de las emisiones globales, con una dependencia significativa de los combustibles fósiles (Alhindawi et al., 2020). La electrificación del transporte, mediante el despliegue masivo de vehículos eléctricos (VE), se posiciona como una solución clave para reducir estas emisiones. Los VE no solo ofrecen beneficios ambientales, sino también oportunidades para mejorar la eficiencia energética mediante la integración con redes inteligentes (M. Yuan et al., 2021)

China y Europa lideran la electrificación del transporte con iniciativas políticas y económicas robustas. En China, los incentivos gubernamentales y la inversión en infraestructura de carga han acelerado la adopción de VE, mientras que, en Europa, el

programa "Fit for 55" de la Unión Europea busca eliminar gradualmente los vehículos de combustión interna para 2035 (Plötz et al., 2023). Estos esfuerzos han demostrado que políticas bien diseñadas pueden generar una transición significativa hacia un transporte más limpio.

La industria, otro gran emisor de GEI, enfrenta desafíos únicos en su transición hacia la electrificación. Procesos como la producción de acero, cemento y productos químicos dependen en gran medida de fuentes de energía intensivas en carbono. La electrificación de estos procesos requiere no solo tecnologías avanzadas, sino también una infraestructura eléctrica robusta y confiable (Wei et al., 2019).

En este contexto, las tecnologías emergentes como el hidrógeno verde y las bombas de calor industriales están desempeñando un papel crucial. Estas tecnologías permiten la electrificación de procesos industriales a gran escala, reduciendo significativamente las emisiones y mejorando la sostenibilidad (Miao et al., 2018).

En la industria, la electrificación puede mejorar la productividad y la competitividad mediante la adopción de tecnologías avanzadas que optimizan los procesos y reducen los costos operativos. Por ejemplo, los sistemas de gestión de energía basados en inteligencia artificial permiten una mejor supervisión y control de los recursos energéticos, maximizando la eficiencia (Ahmad et al., 2021)

A pesar de sus numerosos beneficios, la electrificación enfrenta varios desafíos. Uno de los principales obstáculos es la alta demanda de electricidad, que requiere una expansión significativa de la capacidad de generación y transmisión. Además, la falta de infraestructura de carga para VE y las limitaciones tecnológicas en la electrificación de procesos industriales complejos son barreras importantes(Nadel, 2019).

Otro desafío clave es la dependencia de materiales críticos como el litio, el cobalto y el níquel, esenciales para las baterías de VE y otras tecnologías de almacenamiento. La extracción y procesamiento de estos materiales plantean preocupaciones ambientales y sociales, lo que subraya la necesidad de soluciones sostenibles y reciclaje eficiente (Costa et al., 2021).

El futuro de la electrificación depende de la colaboración entre gobiernos, industria y academia. Las políticas públicas deben fomentar la inversión en infraestructura y tecnologías innovadoras, mientras que las empresas deben adoptar modelos de negocio sostenibles que prioricen la electrificación (Göransson et al., 2019).

Por otro lado, la investigación y el desarrollo continuos son esenciales para superar los desafíos técnicos y garantizar que las tecnologías de electrificación sean accesibles para todas las regiones y sectores. Esto incluye el desarrollo de nuevas soluciones de almacenamiento de energía y sistemas de gestión de red inteligentes que optimicen la integración de fuentes renovables (M. Miller, 2018).

1.8 Implicaciones económicas y sociales en la transición energética

La transición energética global representa una oportunidad sin precedentes para redefinir los sistemas energéticos y avanzar hacia un futuro más sostenible. Sin embargo, este cambio también tiene profundas implicaciones económicas y sociales que requieren atención. Entre los beneficios más destacados se encuentran la creación de empleos verdes y la mejora de la calidad de vida, mientras que los desafíos incluyen garantizar una transición justa que no deje a comunidades vulnerables en desventaja.

La transición hacia una economía verde está estrechamente vinculada con la generación de empleos verdes, definidos como aquellos trabajos que contribuyen a preservar o restaurar el medio ambiente. Estudios han demostrado que las industrias vinculadas a tecnologías limpias y energías renovables ofrecen un potencial significativo para generar empleo. Por ejemplo, la implementación de políticas verdes en el marco del Green New Deal europeo podría incrementar la creación de empleos en sectores como la energía solar, la eólica y la movilidad eléctrica (Caponetti, 2023).

A nivel mundial, la transición hacia empleos verdes también está impulsando la innovación tecnológica y mejorando la productividad en sectores industriales y agrícolas. En países como China, la introducción de tecnologías de baja emisión ha generado un crecimiento sostenido en sectores emergentes, promoviendo una fuerza laboral más cualificada (Jiang & Shen, 2024).

A medida que más países adoptan políticas de transición energética, la coordinación internacional será crucial para maximizar los beneficios y minimizar los costos sociales. Esto incluye el desarrollo de estándares globales para la creación de empleos verdes y la cooperación en la transferencia de tecnologías sostenibles.

El enfoque hacia una transición justa también debe considerar la equidad intergeneracional, garantizando que los costos y beneficios sean compartidos equitativamente entre las generaciones presentes y futuras (García-García et al., 2020).

1.9 Beneficios sociales: calidad de vida y justicia social

La mejora en la calidad de vida es uno de los resultados sociales más significativos de la transición energética. La reducción de emisiones y la implementación de tecnologías sostenibles han llevado a una mejora en la salud pública al disminuir la contaminación del aire en áreas urbanas. Además, el acceso a energías limpias y asequibles puede aliviar la pobreza energética, mejorando las condiciones de vida en comunidades marginadas (Moraliyska, 2023).

El concepto de transición justa destaca la necesidad de proteger a las comunidades y trabajadores que dependen de industrias de altas emisiones. Garantizar que estas comunidades tengan acceso a formación y oportunidades en sectores verdes es clave para prevenir desigualdades económicas y sociales (Park & Bishara, 2023).

Uno de los mayores desafíos en la transición energética es garantizar que los beneficios económicos y sociales se distribuyan equitativamente. La pérdida de empleos en industrias de altas emisiones plantea riesgos significativos, especialmente en regiones altamente dependientes de estas actividades. Por ejemplo, en Europa, las regiones productoras de carbón enfrentan desafíos económicos críticos a medida que se cierran las minas, lo que subraya la necesidad de estrategias locales específicas (McGrath et al., 2023).

La falta de formación para trabajadores desplazados y la ausencia de infraestructuras adecuadas también representan barreras importantes. Los esfuerzos para crear empleos verdes deben incluir programas de formación y desarrollo de habilidades que permitan a

los trabajadores acceder a nuevas oportunidades en sectores sostenibles (Alexander, 2024).

La adopción de políticas públicas inclusivas y bien diseñadas es esencial para garantizar una transición energética equitativa. Esto incluye incentivos para el desarrollo de empleos verdes, así como la creación de programas de formación en competencias clave. Un ejemplo de éxito es el modelo australiano, que integra iniciativas de formación laboral y estímulos fiscales para fomentar la transición hacia una economía más verde (Stilwell, 2021).

Además, las estrategias de financiación juegan un papel crítico. Políticas como los bonos verdes y las tasas de carbono no solo movilizan recursos financieros, sino que también suavizan los impactos económicos en los trabajadores de sectores en declive (Braga & Ernst, 2023).

1.10 Avances en la transición energética global

La transición energética es esencial para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, en particular el ODS 7, que busca garantizar acceso a energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos. Desde 2020, los esfuerzos globales han registrado un crecimiento significativo en energías renovables, alcanzando niveles sin precedentes de inversión e implementación (Bogdanov et al., 2021).

Europa lidera la transición energética, destacando iniciativas como el Green Deal, que establece metas de neutralidad climática para 2050. Este esfuerzo ha transformado la matriz energética de países como Alemania y Dinamarca, integrando un alto porcentaje de fuentes eólicas y solares (Adelekan et al., 2024). Paralelamente, Asia, liderada por China, ha consolidado su posición como líder en capacidad instalada de energía renovable, con más de 400 GW de energía solar en 2023, gracias a políticas de incentivos fiscales y desarrollo tecnológico (Telegina & Khalova, 2022).

Además, la integración de tecnologías avanzadas como redes inteligentes y almacenamiento energético ha sido crucial. Estas herramientas permiten una gestión

eficiente de fuentes intermitentes, facilitando su incorporación en redes eléctricas tradicionales (Kotsampopoulos et al., 2022).

1.11 Aumento en la capacidad de energías renovables

El crecimiento en la capacidad instalada de energías renovables refleja avances tecnológicos y políticas estratégicas. En la última década, las innovaciones en paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas han aumentado la eficiencia energética, reduciendo los costos de generación a niveles competitivos con los combustibles fósiles (Wheatley, 2024).

La energía solar ha sido particularmente exitosa, representando un aumento anual del 15% en capacidad instalada a nivel global. Por su parte, la energía eólica ha mantenido un crecimiento anual del 10%, gracias a avances en materiales y diseño de turbinas (Shah, 2024).

Un desafío importante asociado con la expansión renovable es la competencia por el uso del suelo, especialmente en áreas protegidas y con alta biodiversidad. Un estudio reciente identificó que más de 2000 instalaciones de energía renovable están operando en áreas de conservación global, lo que subraya la necesidad de planificación coordinada para equilibrar objetivos energéticos y de conservación (Rehbein et al., 2020).

En términos de almacenamiento energético, las baterías de iones de litio han jugado un papel crucial en la estabilización de redes eléctricas, mitigando la variabilidad inherente a las energías renovables. Además, tecnologías emergentes como el hidrógeno verde están comenzando a complementar estas soluciones, ofreciendo alternativas para el almacenamiento a largo plazo (Burak & Eldar, 2024).

1.12 Impactos socioeconómicos del crecimiento renovable

La expansión de energías renovables ha generado beneficios económicos significativos. En 2022, las inversiones globales en tecnologías renovables alcanzaron los \$495 mil millones, un aumento del 17% respecto al año anterior. Sin embargo, se requiere triplicar esta inversión para cumplir los objetivos del Acuerdo de París (Bulkot et al., 2023).

Además, la generación de empleos verdes ha sido una consecuencia positiva de la transición. Un análisis global proyecta que el empleo en el sector energético podría aumentar de 21 millones en 2015 a 35 millones en 2050, impulsado por tecnologías como la solar, eólica y almacenamiento en baterías (Ram et al., 2020).

1.13 Desarrollos tecnológicos

Los avances tecnológicos están redefiniendo el panorama energético global. La integración de tecnologías como las redes inteligentes, el almacenamiento de energía y el hidrógeno verde están transformando la manera en que se genera, almacena y distribuye la energía (Jamash et al., 2021).

Las redes inteligentes permiten una gestión más eficiente de los sistemas eléctricos mediante el uso de sensores avanzados y algoritmos que optimizan la distribución energética en tiempo real. Estas redes no solo incrementan la fiabilidad del suministro, sino que también facilitan la integración de fuentes renovables intermitentes como la eólica y la solar (Krause et al., 2024).

Por otro lado, las baterías de iones de litio han experimentado una reducción significativa en costos, haciéndolas más accesibles para proyectos a gran escala. Estas baterías, junto con tecnologías emergentes como el almacenamiento basado en hidrógeno, son fundamentales para abordar los desafíos de la intermitencia en las energías renovables (Altukhova, 2024).

Además, la captura y almacenamiento de carbono (CCS) está ganando relevancia como una solución para reducir emisiones en sectores difíciles de descarbonizar, como la industria pesada y la generación de energía a partir de gas natural (Taghizadeh-Hesary & Yoshino, 2020a).

1.14 Colaboración internacional y financiamiento

La colaboración internacional y los mecanismos de financiamiento son esenciales para superar los desafíos económicos y técnicos de la transición energética. Los modelos de colaboración público-privada han demostrado ser eficaces para movilizar capital y fomentar la innovación tecnológica. Por ejemplo, iniciativas como el Fondo de Innovación

Verde en Europa han acelerado el desarrollo de tecnologías limpias mediante incentivos financieros y asociaciones estratégicas (Soyombo et al., 2024).

El financiamiento sostenible, que incluye bonos verdes y préstamos de impacto social, está ganando tracción como una herramienta clave para apoyar proyectos de energía renovable. Estos instrumentos financieros permiten a los gobiernos y al sector privado atraer inversiones a largo plazo necesarias para la implementación de proyectos a gran escala (Roychoudhury et al., 2022).

En los mercados emergentes, la falta de acceso a capital sigue siendo un desafío crítico. Sin embargo, la implementación de plataformas colaborativas y mecanismos de financiamiento innovadores está cerrando esta brecha. Modelos como el financiamiento por órdenes y los fondos de garantía han demostrado ser efectivos para fomentar la inversión en tecnologías limpias (C. Wang et al., 2021).

Adicionalmente, la cooperación internacional ha facilitado la transferencia de conocimiento y tecnología entre países desarrollados y en desarrollo, permitiendo una adopción más rápida de soluciones innovadoras. Proyectos como la colaboración entre Singapur y Estonia muestran cómo las economías más pequeñas pueden liderar en innovación energética a través de asociaciones estratégicas (Gegenheimer & Gegenheimer, 2021).

Uno de los principales impactos positivos de la transición energética es la creación de empleos verdes, que representan una oportunidad para revitalizar economías locales y nacionales. Los sectores de energía solar y eólica, por ejemplo, han experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, generando empleos en construcción, mantenimiento y operaciones. En comunidades rurales, donde tradicionalmente el acceso al empleo ha sido limitado, estas inversiones en energías renovables han proporcionado nuevas fuentes de ingresos y desarrollo económico local (Uzondu & Lele, 2024). Sin embargo, los beneficios no están distribuidos equitativamente, ya que las regiones dependientes de industrias fósiles enfrentan pérdidas económicas significativas y una crisis laboral que exige una transición justa y planificada.

La desigualdad inherente a la transición energética se ve agravada por la dependencia de recursos críticos como el litio y el cobalto, fundamentales para tecnologías como las baterías de iones de litio. La extracción de estos minerales, concentrada en unos pocos países, plantea preocupaciones ambientales y sociales, además de riesgos geopolíticos que podrían desestabilizar mercados globales (Pasman et al., 2023). En este contexto, las estrategias de diversificación y reciclaje de materiales se presentan como alternativas viables para mitigar los riesgos asociados.

El acceso desigual al financiamiento es otro desafío crítico que limita la implementación de proyectos de energía renovable, especialmente en países en desarrollo. A pesar de los esfuerzos internacionales para promover instrumentos financieros como los bonos verdes, las barreras de entrada siguen siendo altas. Además, la falta de consistencia en las políticas regulatorias a nivel global crea un entorno de incertidumbre que desalienta la inversión a largo plazo (Telegina & Khalova, 2022).

En términos sociales, la transición energética plantea desafíos culturales significativos. La resistencia de comunidades que dependen de la minería del carbón o del petróleo no solo refleja preocupaciones económicas, sino también arraigos culturales y tradiciones laborales profundamente enraizadas. En muchas regiones, los proyectos de energías renovables enfrentan oposición local debido a su impacto visual o a las alteraciones que generan en los ecosistemas locales (Bynoe & Moonsammy, 2023). Por lo tanto, las estrategias de transición deben incorporar procesos participativos y programas de sensibilización que involucren a las comunidades afectadas.

Desde una perspectiva tecnológica, aunque los costos de las energías renovables han disminuido significativamente, la integración de estas fuentes en sistemas eléctricos tradicionales sigue siendo un desafío técnico considerable. La variabilidad inherente de la energía solar y eólica requiere sistemas avanzados de almacenamiento y redes inteligentes para garantizar un suministro constante y confiable (Kabeyi & Olanrewaju, 2022). Sin una infraestructura adecuada, la adopción masiva de energías renovables podría enfrentarse a importantes limitaciones.

En este marco, la colaboración internacional emerge como un componente esencial para abordar los desafíos persistentes de la transición energética. Iniciativas como el Acuerdo

de París han establecido un marco global para mitigar el cambio climático, pero su éxito depende de la cooperación efectiva entre países desarrollados y en desarrollo. Los primeros deben liderar mediante la transferencia de tecnología y el financiamiento, mientras que los segundos deben diseñar políticas adaptadas a sus contextos socioeconómicos y ambientales (Zakeri et al., 2022).

A pesar de los avances logrados, persisten retos significativos. El alto costo inicial de las tecnologías renovables, la resistencia social, las brechas de financiamiento y las limitaciones técnicas subrayan la necesidad de enfoques integrales y estrategias inclusivas. Las políticas públicas deben equilibrar la promoción de inversiones en energías limpias con la protección de los trabajadores y comunidades más vulnerables. Asimismo, la adopción de enfoques interdisciplinarios que integren las dimensiones económicas, sociales y ambientales será clave para garantizar una transición energética exitosa y equitativa.

La transición energética representa una oportunidad única para transformar los sistemas socioeconómicos globales, pero también exige una visión estratégica y un compromiso colectivo para superar los desafíos persistentes. La implementación de políticas coherentes, el desarrollo de infraestructuras resilientes y la promoción de la justicia social son pasos esenciales para garantizar que este proceso no solo sea sostenible, sino también inclusivo y justo.

1.15 El caso de México: desafíos y oportunidades

México enfrenta una encrucijada en su transición energética, derivada de su histórica dependencia de los combustibles fósiles y los retos inherentes a una economía emergente. Aunque se han logrado avances significativos gracias a políticas como la Ley de Transición Energética de 2015, que buscó incrementar el uso de energías limpias y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (von Lüpke & Well, 2020), el país enfrenta desafíos técnicos, económicos y sociales que dificultan la implementación efectiva de estos objetivos.

Uno de los principales retos es la dependencia de México del petróleo y el gas natural para su generación eléctrica. Este problema se ve agravado por la falta de flexibilidad

del sistema eléctrico, lo que limita la integración de fuentes renovables como la solar y la eólica. Según Diezmartínez (2021) , aunque la energía solar y eólica tienen un potencial considerable en México, su integración requiere una modernización de las redes eléctricas y el desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético, como las baterías avanzadas. Además, el marco regulatorio actual no incentiva adecuadamente la inversión en estas tecnologías.

La energía eólica ha demostrado ser una de las áreas con mayor potencial de desarrollo. En estados como Oaxaca, los vientos fuertes y constantes han permitido la instalación de parques eólicos que generan una proporción significativa de electricidad. Sin embargo, estos proyectos no han estado exentos de controversias sociales. En regiones indígenas, como Yucatán, la falta de consulta previa y la exclusión de las comunidades locales han generado conflictos que obstaculizan el progreso (El Mekaoui et al., 2020). Esto subraya la necesidad de gobernanza inclusiva y un enfoque más participativo en la planificación de proyectos energéticos.

Por otro lado, la energía solar fotovoltaica presenta una oportunidad única para diversificar la matriz energética del país. Estudios recientes indican que México podría generar hasta el 30% de su electricidad mediante energía solar para 2050, siempre y cuando se implementen políticas efectivas de apoyo y se invierta en infraestructura (Icaza-Alvarez et al., 2023). Este potencial es particularmente relevante en zonas desérticas del norte del país, donde los niveles de irradiación solar son de los más altos del mundo.

En términos de marco regulatorio, la Ley de Transición Energética buscó establecer metas ambiciosas para el uso de energías renovables. Sin embargo, su implementación se ha visto obstaculizada por decisiones políticas que priorizan el uso de combustibles fósiles en detrimento de las renovables. Este fenómeno, conocido como "carbon lock-in", describe cómo la infraestructura y los intereses económicos existentes perpetúan la dependencia de energías no sostenibles (Hernandez et al., 2021).

En el ámbito económico, los altos costos iniciales de las tecnologías renovables representan una barrera para su adopción, particularmente para hogares de bajos ingresos y pequeñas empresas. No obstante, un estudio realizado en Aguascalientes

demonstró que los consumidores están dispuestos a pagar tarifas más altas por electricidad renovable si esto también conlleva la creación de empleos verdes (Martínez-Cruz & Núñez, 2021). Este hallazgo subraya la importancia de involucrar a la sociedad en el diseño de políticas energéticas.

La colaboración internacional emerge como un factor crítico para superar estos desafíos. México podría beneficiarse de la transferencia tecnológica y el financiamiento de organismos internacionales para implementar proyectos de energía renovable a gran escala. Asimismo, la cooperación regional con países como Estados Unidos y Canadá ofrece oportunidades para la interconexión eléctrica y la exportación de excedentes de energía limpia (Grande-Acosta et al., 2024).

A pesar de los desafíos, el caso de México también presenta oportunidades significativas. El país cuenta con recursos renovables abundantes, como la irradiación solar y el potencial eólico, que pueden ser aprovechados para reducir su dependencia de los combustibles fósiles. Además, el creciente interés por las energías renovables en el ámbito global podría facilitar la atracción de inversiones extranjeras en este sector.

En conclusión, la transición energética en México representa un desafío complejo pero imprescindible para cumplir con los compromisos internacionales en materia de sostenibilidad y mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Aunque la dependencia de los combustibles fósiles y los conflictos sociales representan barreras significativas, el potencial de las energías renovables y el apoyo público para su desarrollo ofrecen razones para el optimismo. Sin embargo, será crucial desarrollar políticas coherentes, fomentar la inversión estratégica y garantizar que los beneficios de esta transición se distribuyan de manera equitativa.

1.16 Objetivos de la investigación

Un objetivo esencial de esta investigación es analizar cómo la planificación energética puede ser optimizada para alinear las estrategias nacionales con los compromisos internacionales en materia de cambio climático, como el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Según Kabeyi & Olanrewaju (2022), la planificación energética debe considerar dimensiones clave como la sostenibilidad ambiental, la

viabilidad económica y la justicia social para lograr una transición exitosa y equitativa. En este sentido, se explorarán marcos conceptuales que integren estas dimensiones en el diseño y la evaluación de políticas energéticas.

Para alcanzar este objetivo principal, esta investigación también se propone incorporar metodologías avanzadas, como la **evaluación del ciclo de vida (LCA)**, para analizar los impactos ambientales de las tecnologías y sistemas energéticos. La LCA proporciona una herramienta científica que permite cuantificar y comparar los efectos ambientales a lo largo de todas las etapas de un producto o sistema, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Blanco et al. (2020) destacan que la integración de la LCA en la planificación energética es fundamental para evitar desplazamientos de impacto entre diferentes etapas del ciclo de vida y para asegurar que las tecnologías renovables seleccionadas no generen impactos ambientales adversos inadvertidos.

Además, se busca evaluar cómo los **indicadores ambientales** pueden ser utilizados para guiar decisiones estratégicas en la transición energética. Indicadores como la huella de carbono, la huella hídrica y el potencial de toxicidad ambiental ofrecen una perspectiva cuantitativa que facilita la comparación de tecnologías energéticas y la priorización de soluciones sostenibles. Reid & Rout (2020) argumenta que el desarrollo de indicadores robustos y específicos no solo mejora la transparencia en la toma de decisiones, sino que también permite establecer metas medibles que estén alineadas con los compromisos internacionales.

Otro aspecto importante de esta investigación es el análisis de las **sinergias entre tecnologías emergentes** y las herramientas de evaluación ambiental. Tecnologías como las baterías de almacenamiento energético y las redes inteligentes están transformando los sistemas eléctricos tradicionales, y su impacto ambiental debe ser cuidadosamente evaluado. Zhang et al. (2020) sugieren que estas tecnologías pueden ofrecer beneficios significativos si se diseñan e implementan con un enfoque que priorice la sostenibilidad en su ciclo de vida.

Por otra parte, se propone abordar los desafíos metodológicos asociados con la aplicación de la LCA en sistemas energéticos complejos. Esto incluye resolver problemas relacionados con la calidad de los datos, la delimitación de los sistemas y la interpretación

de resultados. Bucur et al. (2021) destacan que la vinculación de modelos energéticos con indicadores de sostenibilidad puede mejorar la precisión y la aplicabilidad de los análisis, lo que resulta crucial para diseñar estrategias efectivas de transición energética.

Esta investigación también pretende proponer un marco conceptual que combine la planificación energética, la evaluación ambiental y los compromisos internacionales. Este marco incluirá lineamientos prácticos para la integración de la LCA y los indicadores ambientales en la toma de decisiones estratégicas, asegurando que las políticas energéticas sean técnicamente viables y ambientalmente responsables. Liu et al. (2020) subrayan que la regionalización de los análisis es esencial para abordar las particularidades de cada contexto geográfico y garantizar que las recomendaciones sean relevantes y aplicables.

Finalmente, se espera que esta investigación no solo contribuya al conocimiento académico en el campo de la transición energética, sino que también proporcione herramientas prácticas y recomendaciones que puedan ser implementadas por gobiernos, empresas y organismos internacionales. Con este enfoque, se busca avanzar hacia sistemas energéticos sostenibles que equilibren las necesidades ambientales, económicas y sociales.

1.17 Contribuciones de la investigación

La investigación realizada ha dado lugar a desarrollos que fortalecen la planificación estratégica de sistemas energéticos sostenibles, generando aportaciones concretas. Estas contribuciones abordan desde la optimización de sistemas eléctricos interconectados hasta la evaluación de impactos ambientales con metodologías avanzadas, proporcionando herramientas útiles para el diseño de políticas energéticas. Una de las principales contribuciones es la incorporación de plantaciones forestales en el marco de la planificación energética, vinculándolas con iniciativas como el programa "Sembrando Vida". Esta estrategia demuestra cómo la reforestación planificada puede actuar como una solución ecológica y económica para mitigar emisiones de carbono al tiempo que apoya las necesidades energéticas del país.

Un elemento clave del estudio es el desarrollo y aplicación de un modelo matemático integral que evalúa la interacción entre instalaciones de generación de energía, expansiones de líneas de transmisión y estrategias de forestación. Entre los resultados destacados de este modelo se encuentran escenarios prácticos que ilustran los compromisos entre costos anuales totales y la maximización del beneficio social. Por ejemplo, un escenario crítico demuestra cómo la inversión en 11 nuevas líneas de transmisión, junto con esfuerzos sustanciales de reforestación, produce los mayores beneficios sociales. Esto resalta el papel fundamental de la sinergia entre infraestructura y estrategias ambientales en la construcción de un sistema energético sostenible.

Una de las principales contribuciones metodológicas es el desarrollo de un modelo de planificación energética que incorpora criterios multidimensionales, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el ahorro de recursos naturales y la optimización económica. Este modelo evalúa escenarios de expansión de redes eléctricas, destacando cómo la interconexión de sistemas mejora la estabilidad energética y reduce la necesidad de recursos fósiles. Los puntajes generados mediante este modelo ofrecen una medida cuantitativa del desempeño de los sistemas en términos de sostenibilidad y viabilidad técnica, lo que permite priorizar proyectos con los mayores beneficios ambientales.

El modelo también introduce una evaluación detallada del impacto de las líneas de transmisión en la eficiencia energética general. Por ejemplo, la interconexión entre regiones con diferentes capacidades de generación renovable ha demostrado ser un factor clave para maximizar el aprovechamiento de fuentes solares y eólicas. En regiones con altas tasas de generación intermitente, como en el noroeste de México, el modelo propone soluciones específicas para reducir pérdidas de transmisión y equilibrar la carga entre zonas aisladas y áreas de alta demanda.

La metodología desarrollada incluye un sistema de puntajes que evalúa proyectos de infraestructura eléctrica en función de su desempeño ambiental y técnico. Estos puntajes consideran indicadores clave como el consumo de agua, las emisiones acumuladas de CO₂ y la dependencia de materiales críticos. El análisis de los resultados muestra que los proyectos que priorizan la interconexión de sistemas tienen puntajes más altos debido

a su el impacto de la instalación de líneas de transmisión, buscando optimizar el flujo de energía. Esta evaluación es especialmente útil para tomar decisiones informadas en la selección de proyectos que maximicen el beneficio ambiental.

En particular, el análisis muestra que las regiones con menor desarrollo en infraestructura eléctrica, al ser conectadas mediante líneas de transmisión optimizadas, incrementan significativamente sus puntajes de sostenibilidad. Esto es especialmente relevante en contextos donde la generación renovable está subutilizada debido a la falta de capacidad de transporte eléctrico. Los puntajes también reflejan cómo las mejoras en las líneas de transmisión reducen las emisiones de GEI indirectas asociadas con la generación fósil utilizada como respaldo.

La interconexión de sistemas eléctricos es otro aspecto crucial abordado en esta investigación. Los resultados indican que conectar regiones aisladas a una red nacional o regional más amplia no solo mejora la estabilidad del suministro, sino que también reduce costos operativos. Por ejemplo, las simulaciones realizadas en el modelo demuestran que, al integrar sistemas eléctricos aislados con altos niveles de generación renovable, se logra una disminución en las tasas de desperdicio de energía y una reducción significativa de los costos de generación.

Este enfoque también permite identificar áreas donde la generación distribuida puede complementar las capacidades de transmisión, reduciendo la necesidad de inversiones a gran escala en infraestructura tradicional. En casos donde los sistemas eléctricos están altamente fragmentados, como en ciertas áreas rurales, la interconexión ayuda a resolver problemas de intermitencia asociados con fuentes renovables, estabilizando la red y facilitando un uso más eficiente de los recursos.

Los resultados empíricos de esta investigación destacan la importancia de una planificación adecuada basada en datos de alta calidad y simulaciones robustas. En los casos estudiados, el análisis mostró cómo la aplicación de estas metodologías permite optimizar el diseño de sistemas eléctricos al identificar los puntos críticos donde las intervenciones generan mayores beneficios. Por ejemplo, en México, las propuestas de interconexión entre regiones con alta generación solar y aquellas con mayor demanda

eléctrica mostraron una reducción de emisiones de hasta un 40%, además de disminuir los costos operativos en un 25%.

En conjunto, estas contribuciones ofrecen un marco sólido para la planificación energética en contextos de transición energética. La integración de puntajes de sostenibilidad y la optimización de sistemas interconectados representan avances metodológicos que pueden ser replicados en otros países y regiones con características similares. Estas herramientas permiten una toma de decisiones más informada, basada en indicadores cuantitativos que reflejan los impactos ambientales y técnicos de las estrategias propuestas. Con estos desarrollos, la investigación no solo responde a los desafíos actuales de sostenibilidad, sino que también establece un precedente para futuras iniciativas en la transición energética.

2 Antecedentes

2.1 Planificación estratégica

2.1.1 Definición de planificación estratégica en el sector energético

La planificación estratégica en el sector energético se define como el proceso de diseñar y gestionar políticas, estrategias y acciones para garantizar el suministro sostenible, seguro y eficiente de energía. Este concepto abarca una evaluación integral de los recursos disponibles, las tecnologías emergentes, las demandas energéticas y los impactos ambientales, económicos y sociales relacionados (Gidden et al., 2019). Además, este enfoque busca alinear las metas energéticas con compromisos internacionales como el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (McCollum et al., 2018).

En el contexto energético, la planificación estratégica incluye también el desarrollo de escenarios que anticipen cambios regulatorios, tecnológicos y del mercado. Es crucial para gestionar transiciones hacia sistemas de energía renovable y redes inteligentes, minimizando riesgos y maximizando oportunidades (Hong et al., 2019).

2.1.2 Evolución histórica de la planificación estratégica en el sector

La evolución de la planificación estratégica en el sector energético está marcada por hitos clave que reflejan las transformaciones tecnológicas y las prioridades socioeconómicas. Durante la Revolución Industrial, el carbón fue el principal recurso energético, dando origen a los primeros esquemas de planificación centrados en la expansión de infraestructura y la seguridad del suministro (De Pascali & Bagaini, 2018).

En el siglo XX, el petróleo y el gas natural se consolidaron como las fuentes energéticas predominantes, llevando a una planificación centrada en la exploración, distribución y almacenamiento de estos combustibles (Epelle & Gerogiorgis, 2020). La crisis del petróleo de los años 70 marcó un punto de inflexión, con una mayor atención en la diversificación de fuentes y la seguridad energética.

A partir de los años 90, los debates sobre el cambio climático impulsaron la incorporación de objetivos ambientales en la planificación energética. Con el siglo XXI llegaron innovaciones tecnológicas, como las energías renovables y las redes inteligentes, que redefinieron las prioridades estratégicas hacia la sostenibilidad (Jasanoff & Kim, 2015).

2.1.3 Principales enfoques teóricos y metodológicos utilizados

La planificación estratégica en el sector energético se basa en una variedad de enfoques teóricos y metodológicos que permiten abordar la complejidad del sistema energético:

1. **Análisis de sistemas:** Este enfoque modela las interacciones entre diferentes componentes del sistema energético, evaluando escenarios basados en factores como costos, emisiones y eficiencia (Pfenninger et al., 2017). Dentro de este análisis de sistemas, los modelos que consideran la estructura jerárquica de los mercados eléctricos y el impacto de los incentivos económicos en el comportamiento de los participantes son esenciales, especialmente en sistemas energéticos complejos como los sistemas de energía combinada (CHP) o de almacenamiento (Dowling et al., 2017).

2. **Teoría de decisiones multicriterio (MCDM):** Facilita la evaluación de alternativas energéticas considerando criterios múltiples como impacto ambiental, viabilidad económica y aceptación social (Wang et al., 2019).
3. **Modelos de equilibrio general computable (CGE):** Utilizados para analizar las interacciones entre el sector energético y otros sectores económicos, estos modelos permiten predecir impactos macroeconómicos (Bataille et al., 2018)..
4. **Análisis prospectivo:** Explora posibles futuros energéticos mediante la construcción de escenarios, ayudando a tomar decisiones bajo incertidumbre (Geels, 2018). Estos análisis, sin embargo, se benefician enormemente de la incorporación de modelos de optimización que permitan evaluar la factibilidad técnica y económica de diversos escenarios, considerando las interacciones entre la generación renovable, el almacenamiento de energía y las tecnologías de eficiencia energética (Zhao & You, 2020).
5. **Evaluación del ciclo de vida (LCA):** Permite medir los impactos ambientales de los sistemas energéticos a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de recursos hasta su disposición final (Hellweg & Canals, 2014).

2.1.4 Retos y tendencias actuales

Retos

1. **Descarbonización:** La eliminación gradual de los combustibles fósiles enfrenta obstáculos técnicos, económicos y sociales. A pesar de los avances tecnológicos, los costos iniciales y las brechas de infraestructura limitan el progreso (Friedlingstein et al., 2022).
2. **Integración de fuentes renovables:** La variabilidad de la generación solar y eólica plantea desafíos en la estabilidad de las redes eléctricas. Esto requiere el desarrollo de tecnologías de almacenamiento y redes inteligentes (Bistline & Blanford, 2021).
3. **Justicia energética:** Asegurar que los beneficios de la transición se distribuyan equitativamente es un reto clave, especialmente en regiones vulnerables y en

comunidades dependientes de la industria de combustibles fósiles (Jenkins et al., 2021).

4. **Coordinación global:** La falta de armonización en las políticas internacionales dificulta el avance hacia metas comunes, como las establecidas por el Acuerdo de París (Rogelj et al., 2016).

Tendencias

1. **Electrificación de sectores clave:** El transporte y la industria están siendo electrificados mediante tecnologías limpias, como los vehículos eléctricos y el hidrógeno verde (Creutzig et al., 2021).
2. **Digitalización:** Las redes inteligentes y el uso de datos en tiempo real están optimizando la distribución y consumo de energía, mejorando la eficiencia y reduciendo emisiones (Albogamy et al., 2021).
3. **Tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS):** Están ganando relevancia para mitigar emisiones en sectores difíciles de descarbonizar (Paltsev et al., 2021).
4. **Financiamiento verde:** Instrumentos como bonos verdes y préstamos de impacto social están movilizando capital para proyectos de energía sostenible (Taghizadeh-Hesary & Yoshino, 2020b).
5. **Innovación en materiales:** Nuevos materiales para baterías y paneles solares están mejorando la eficiencia y reduciendo costos, impulsando una adopción más amplia (Manthiram, 2011).

2.2 Indicadores ambientales

2.2.1 Definición y clasificación de indicadores ambientales

Los indicadores ambientales son herramientas cuantitativas y cualitativas que permiten evaluar, monitorear y comparar los impactos ambientales de actividades, productos o servicios. Estos indicadores son fundamentales para integrar criterios de sostenibilidad

en la toma de decisiones, especialmente en sectores como el energético, donde los impactos ambientales son significativos (Finnveden et al., 2009).

La clasificación de indicadores ambientales incluye indicadores de presión, que evalúan las actividades humanas que generan impactos ambientales, como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) o el consumo de agua. También están los indicadores de estado, que miden el estado actual del medio ambiente, como la calidad del aire, la biodiversidad o la cantidad de recursos disponibles. Por último, los indicadores de respuesta reflejan las acciones tomadas para mitigar o prevenir daños ambientales, como la implementación de tecnologías limpias o políticas de energía renovable (Ness et al., 2007).

Dentro de los indicadores más utilizados se encuentran el ECO-99, un método de análisis del ciclo de vida que mide impactos en salud humana, calidad de ecosistemas y recursos naturales (Goedkoop & Spriensma, 2001). También destaca la huella de carbono, que cuantifica las emisiones de GEI asociadas a un producto, actividad o servicio (Peters, 2010), y la huella hídrica, que mide el consumo directo e indirecto de agua dulce en procesos productivos (Hoekstra & Mekonnen, 2012).

2.2.2 Relevancia de los indicadores ambientales en el sector energético

En el sector energético, los indicadores ambientales desempeñan un papel crítico al proporcionar información clave para la transición hacia sistemas energéticos sostenibles. Estos indicadores permiten evaluar impactos ambientales, como la cuantificación de la huella de carbono y la huella hídrica, que ayudan a identificar las repercusiones de diferentes tecnologías energéticas, desde combustibles fósiles hasta energías renovables (Bruckner et al., 2014). Además, son fundamentales para promover la sostenibilidad, ya que su integración en políticas energéticas, mediante métodos como ECO-99, facilita la identificación de soluciones que minimicen los impactos negativos sobre el medio ambiente (Finnveden et al., 2009). Los indicadores también facilitan la toma de decisiones al proveer datos objetivos que respaldan decisiones informadas sobre inversiones, regulaciones y tecnologías prioritarias. Por último, permiten alinear estrategias energéticas con objetivos globales, como los compromisos establecidos en

el Acuerdo de París, a través de herramientas como la medición de la huella de carbono (Rogelj et al., 2016).

2.2.3 Indicadores ambientales para evaluar impactos en el sector energético

Varios estudios han aplicado indicadores ambientales para evaluar los impactos de diversas tecnologías energéticas. Las energías renovables, por ejemplo, han sido objeto de numerosos análisis. Un estudio reciente sobre parques eólicos mostró que, aunque reducen significativamente la huella de carbono, su huella hídrica puede ser considerable debido a los procesos de fabricación y mantenimiento (Arana-Landín et al., 2020). En los sistemas híbridos, que combinan energía solar y almacenamiento en baterías, se ha demostrado que minimizan los impactos ambientales en comparación con sistemas tradicionales (Xu et al., 2020). En cuanto a los biocombustibles, la evaluación del ciclo de vida ha revelado que, aunque son una alternativa sostenible, pueden generar impactos negativos en la biodiversidad y el uso de agua (Cherubini, 2010).

A pesar de sus beneficios, el uso de indicadores ambientales enfrenta varias limitaciones. Una de las principales es la falta de estandarización, ya que la diversidad de metodologías para calcular indicadores como la huella de carbono dificulta comparaciones entre estudios (Laurent et al., 2012). Además, la complejidad en la recolección de datos puede representar un desafío significativo, especialmente en sectores con cadenas de suministro complejas (Hellweg & Canals, 2014). Otro problema es el enfoque limitado de algunos indicadores, como la huella de carbono, que no considera otros impactos ambientales importantes, como la biodiversidad o la calidad del agua (Goedkoop & Spriensma, 2001). Además, políticas centradas exclusivamente en reducir emisiones de gases de efecto invernadero pueden generar 'burden-shifting', desplazando impactos negativos hacia otras categorías ambientales, como el uso de recursos o la toxicidad (Algunaibet & Guillén-Gosálbez, 2019). Los costos asociados también son una barrera, ya que implementar sistemas para medir y monitorear indicadores puede ser costoso, lo que limita su adopción en economías en desarrollo (Lee & Joo, 2023). Finalmente, los desafíos en la interpretación de resultados generan incertidumbre en la toma de decisiones, ya que los resultados pueden variar según los enfoques metodológicos utilizados (Keith & Ahner, 2019).

2.3 Análisis de sostenibilidad

2.3.1 El concepto de sostenibilidad en el sector energético

La sostenibilidad en el sector energético ha evolucionado como un eje fundamental en la transición hacia un modelo energético global más equilibrado. Según Hafner & Tagliapietra (2020a), se refiere a satisfacer las necesidades energéticas actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. Este paradigma se alinea estrechamente con las metas establecidas en el Acuerdo de París, que exige limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 °C y promover fuentes de energía limpias y renovables (K. Tanaka & O'Neill, 2018)

La transición energética no solo busca reducir la dependencia de combustibles fósiles, sino también integrar consideraciones sociales y económicas, como la creación de empleos verdes y la equidad energética. (Robertson Munro & Cairney, 2020) analiza que esta transición requiere un rediseño sistémico, incorporando tecnologías avanzadas y políticas sólidas que impulsen el cambio hacia la sostenibilidad.

2.3.2 Métodos más utilizados en el análisis de sostenibilidad

Los métodos de análisis de sostenibilidad combinan enfoques técnicos y conceptuales para evaluar el impacto y viabilidad de proyectos energéticos. Entre los métodos más destacados se incluyen:

1. **Análisis de ciclo de vida (ACV):** Este enfoque cuantifica el impacto ambiental de los sistemas energéticos durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de recursos hasta el final de su uso. (Sayed et al., 2021) destacan su capacidad para identificar puntos críticos que afectan la sostenibilidad de sistemas renovables emergentes. Si bien el ACV es valioso, su aplicación en economías con alta dependencia de combustibles fósiles, como México, puede revelar una fuerte influencia de estos en los resultados, enfatizando la necesidad de complementar el ACV con otras herramientas que evalúen la sostenibilidad de manera más integral (Santoyo-Castelazo et al., 2011).

2. **Análisis multicriterio (AMC):** Utilizado para evaluar sistemas energéticos bajo diferentes criterios (económicos, sociales, ambientales), este método es particularmente relevante en escenarios donde deben equilibrarse intereses diversos (Witt et al., 2020).
3. **Evaluaciones integradas:** Los modelos integrados, como los aplicados por (Nieto et al., 2020), proyectan escenarios de transición energética considerando aspectos como emisiones, costos y accesibilidad.
4. **Indicadores de sostenibilidad:** Estos instrumentos incluyen métricas como huella de carbono, huella hídrica y balance energético, proporcionando una base cuantitativa para la toma de decisiones (Dizdaroglu, 2017).

2.3.3 Estudios integradores de sostenibilidad económica, social y ambiental

Diversos estudios han explorado la intersección entre sostenibilidad económica, social y ambiental. Por ejemplo, (Carley & Konisky, 2020) analizan la justicia energética, abordando la equidad en la distribución de recursos y beneficios de las transiciones hacia energías limpias. Este enfoque garantiza que las comunidades vulnerables no sean excluidas del proceso.

En el ámbito económico, Bistline & Blanford (2020) examina los impactos de tecnologías renovables, destacando su capacidad para reducir costos a largo plazo, aunque advierte sobre desafíos iniciales de inversión y escalabilidad. Asimismo, Nagatomo et al. (2021) exploran el potencial de las energías renovables para crear empleo, particularmente en regiones en transición de economías basadas en combustibles fósiles.

Desde la perspectiva ambiental, estudios como el de Kang et al. (2020) subrayan que la electricidad renovable de bajo costo es un motor crucial para mitigar el cambio climático y garantizar el acceso energético universal. Un ejemplo destacado es el trabajo de Atilgan & Azapagic (2017), quienes realizaron una evaluación integral de 14 escenarios de generación eléctrica en Turquía hasta 2050, considerando aspectos ambientales, económicos y sociales. Su estudio identificó que los escenarios con mayor participación de energías renovables y nucleares son las opciones más sostenibles, aunque presentan

desafíos significativos en términos de costos y depleción de recursos. Este enfoque integrador es fundamental para diseñar políticas energéticas que equilibren los tres pilares de la sostenibilidad.

2.3.4 Conexión con políticas globales y regionales

La integración de políticas energéticas y climáticas es crucial para alcanzar los objetivos de sostenibilidad. A nivel global, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) ofrecen un marco normativo que conecta la energía con el desarrollo social y económico. En particular, el ODS 7 promueve la energía asequible y sostenible como catalizador para otros objetivos, como el crecimiento económico inclusivo y la reducción de desigualdades (Manoj Kumar et al., 2020)

En el ámbito regional, García Hernández & Lucatello (2022) examinan los desafíos de México en la integración de políticas climáticas y energéticas, resaltando la necesidad de marcos regulatorios consistentes y la promoción de tecnologías renovables. Este caso es representativo de las tensiones que enfrentan muchas economías en desarrollo al intentar equilibrar sus compromisos ambientales con sus necesidades de desarrollo económico.

La pandemia y los conflictos geopolíticos recientes han reforzado la importancia de políticas resilientes y adaptativas. Zakeri et al. (2022) destacan que estos eventos han alterado significativamente las trayectorias de transición energética, exigiendo mayor colaboración internacional y el uso eficiente de tecnologías avanzadas.

2.4 Enfoques integradores

En el ámbito de la sostenibilidad energética, los enfoques integradores representan un área de investigación crucial, especialmente en la combinación de planificación estratégica, indicadores ambientales y análisis de sostenibilidad. Este apartado revisa los estudios relevantes, explora modelos y herramientas computacionales, e identifica vacíos en la literatura y áreas para mejorar en este campo.

2.4.1 Revisión de estudios integradores

Diversos trabajos han enfatizado la importancia de combinar planificación estratégica con indicadores ambientales y análisis de sostenibilidad. Según Mikulčić et al. (2021), integrar sistemas de energía renovable con evaluaciones ambientales y estratégicas permite diseñar infraestructuras más resilientes y económicamente viables. Este enfoque resulta esencial en la transición energética global hacia un modelo sostenible.

Por otro lado, Vakulchuk et al. (2020) destacan que la transición energética no debe centrarse únicamente en aspectos técnicos, sino también abordar los impactos geopolíticos y sociales. Estas investigaciones subrayan la necesidad de conectar las decisiones políticas con indicadores ambientales claros para mitigar desigualdades y riesgos asociados.

Además, Jenkins et al. (2021) abordan la inclusión de justicia energética en modelos integradores. Los autores argumentan que los enfoques sostenibles deben considerar explícitamente la equidad social, asegurando que comunidades vulnerables participen y se beneficien de las transformaciones del sistema energético.

Otros estudios, como el de Friedlingstein et al. (2022), remarcan la relevancia de integrar métricas del carbono en estrategias de planificación energética, destacando que los presupuestos de carbono deben alinearse con objetivos de descarbonización para limitar el calentamiento global.

2.4.2 Modelos y herramientas computacionales para enfoques integradores

El uso de herramientas computacionales ha facilitado significativamente la integración de planificación estratégica, indicadores ambientales y sostenibilidad. En este sentido, la optimización multiobjetivo se ha convertido en una técnica clave. Según Rezaeimozafar et al. (2020), este método permite modelar escenarios energéticos que equilibran costos, eficiencia energética e impactos ambientales. Un enfoque avanzado en esta área es el desarrollo de modelos de optimización a gran escala que consideran simultáneamente múltiples aspectos del diseño del sistema, como la selección del fluido de trabajo, la temperatura de la fuente de calor y el sistema de refrigeración, como se ha demostrado

para sistemas geotérmicos binarios mediante la optimización del ciclo de vida (Tian et al., 2020).

Otra herramienta ampliamente utilizada es el análisis del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés). (Rashedi & Khanam, 2020) explican que el LCA permite evaluar el impacto ambiental completo de las tecnologías energéticas, desde su producción hasta su eliminación, proporcionando una visión integral de sostenibilidad.

En el campo de los sistemas híbridos, Kebede et al. (2021) argumenta que la integración de energía eólica y solar con almacenamiento eficiente, como baterías de litio, es crucial para superar la intermitencia de estas fuentes renovables. Esto subraya la necesidad de enfoques integrales que combinen innovación tecnológica con estrategias de sostenibilidad.

Por otro lado, el hidrógeno ha ganado atención como un vector energético clave. Según (Ram et al., 2020), los modelos computacionales que simulan escenarios de hidrógeno verde pueden mejorar la planificación estratégica y reducir los costos asociados con su adopción a gran escala. Además de estas herramientas, los modelos de unit commitment estocástico, que consideran la incertidumbre en la generación de energía, son esenciales para la planificación y operación eficientes de sistemas energéticos con altas penetraciones de energías renovables (Kim & Zavala, 2016).

2.4.3 Identificación de vacíos y áreas de mejora

A pesar de los avances significativos, persisten vacíos importantes en la literatura. Un desafío recurrente es la integración efectiva de métricas de sostenibilidad en modelos estratégicos. Según (Laurent et al., 2012), los indicadores actuales suelen ser incompletos, lo que dificulta la evaluación real de los impactos ambientales y sociales de las políticas energéticas.

Además, existe una falta de estudios longitudinales que analicen el impacto de las políticas energéticas en el tiempo. Nadeem et al. (2024) sugieren que los modelos deberían incluir mecanismos de retroalimentación continua para ajustar las estrategias según los resultados observados.

Otro vacío identificado es la escasez de datos accesibles y confiables en economías emergentes. Según Peñalvo-López et al. (2019), estas regiones enfrentan desafíos específicos, como marcos regulatorios insuficientes y falta de financiamiento, que limitan su capacidad para implementar enfoques integradores.

Por último, la adopción de tecnologías avanzadas como inteligencia artificial y aprendizaje automático sigue siendo limitada. Szczepaniuk & Szczepaniuk (2022) resalta que estas herramientas tienen un gran potencial para optimizar la planificación energética y analizar indicadores ambientales, pero enfrentan barreras técnicas, éticas y regulatorias.

2.5 Análisis de implementaciones en la transición energética

La transición energética hacia sistemas más sostenibles implica un conjunto diverso de estrategias que abarcan tecnologías, políticas públicas y metodologías de análisis adaptadas a los contextos específicos de cada país. A través de una revisión detallada de los estudios de caso en Estados Unidos, Alemania y Japón, este texto explora los enfoques clave implementados para acelerar la transición en el sector de la energía eléctrica, destacando políticas, metodologías y tecnologías aplicadas en diferentes países.

2.5.1 Estados Unidos: políticas de impulso a las energías renovables

Estados Unidos ha desempeñado un papel crucial en la transición hacia energías limpias, con un enfoque específico en la promoción de tecnologías como la solar, eólica, biocombustibles y vehículos eléctricos (Stokes & Breetz, 2018). Este enfoque se ha materializado mediante incentivos fiscales y subsidios, que han facilitado el desarrollo de una infraestructura renovable robusta. Un ejemplo de esto es la Ley de Políticas de Energía de 2005, que otorgó créditos fiscales a proyectos renovables, especialmente en tecnologías solares y eólicas.

Además, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada en Energía (ARPA-E) se estableció para fomentar la innovación tecnológica. Haley (2017) destaca que ARPA-E ha actuado como un catalizador al apoyar proyectos disruptivos que, de otro modo,

enfrentarían barreras financieras o tecnológicas. Esta estrategia también ha fortalecido la colaboración entre el sector privado y el público, ampliando el impacto de las políticas energéticas. Por otro lado, (C. A. Miller et al., 2015) proponen un marco político que enfatiza la integración de los sistemas socio energéticos. Este enfoque promueve una transición inclusiva mediante el análisis de los impactos sociales y ambientales de las políticas energéticas.

Domínguez et al. (2015) también resaltan la importancia de avanzar hacia sistemas completamente renovables mediante una planificación que optimice el uso de recursos y maximice el aprovechamiento de fuentes renovables, destacando que una red eléctrica bien diseñada es fundamental para el éxito de la transición.

2.5.2 Alemania: mezcla de políticas y escenarios sociotécnicos

Alemania es líder en la transición energética global, gracias a su compromiso con la energía limpia y su ambicioso programa Energiewende, que tiene como objetivo reducir significativamente las emisiones de carbono y aumentar la participación de energías renovables. (Rogge et al., 2020) destacan el uso de "mezclas políticas transformativas" para implementar escenarios sociotécnicos que anticipen el impacto de las decisiones actuales en el sistema eléctrico a largo plazo.

Estas mezclas políticas combinan instrumentos regulatorios, fiscales y de mercado. Un ejemplo clave es la implementación de tarifas feed-in, que han incentivado a los generadores de energía renovable al garantizar precios estables por la electricidad producida. Además, Alemania ha adoptado una metodología basada en el "análisis del ciclo de vida", asegurando que las tecnologías renovables no solo sean ambientalmente sostenibles, sino también económicamente viables (Markard, 2018).

En el contexto de la movilidad eléctrica, Truffer et al. (2017) subrayan la importancia de descentralizar las evaluaciones tecnológicas, integrando factores sociales y técnicos. Este enfoque ha permitido una transición más inclusiva y adaptada a las necesidades de diversas regiones.

Bauknecht et al. (2020) también destacan los desafíos de la gobernanza de redes eléctricas en Alemania, enfatizando la necesidad de enfoques integrados que aborden cambios sistémicos en el sector eléctrico.

Arapostathis et al. (2013) aportan una perspectiva histórica al analizar las transiciones en el sector energético del Reino Unido. Este enfoque resalta la relevancia de las lecciones del pasado para diseñar estrategias actuales, especialmente en el manejo de transiciones tecnológicas y regulatorias.

2.5.3 Japón: diseño de políticas y simulación para la transición

Japón ha enfrentado desafíos únicos en su transición energética, exacerbados por el accidente nuclear de Fukushima en 2011. Este evento impulsó al país a rediseñar su sistema eléctrico, priorizando la diversificación de fuentes energéticas y la seguridad del suministro. Y. Tanaka et al. (2020) destacan cómo Japón ha utilizado simulaciones para diseñar mezclas políticas que optimicen la transición hacia sistemas más sostenibles.

Una de las estrategias clave en Japón ha sido el desarrollo de tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía, que permiten una mayor integración de fuentes intermitentes como la solar y la eólica. Sidhu et al. (2018) subrayan la relevancia de los proyectos de almacenamiento a escala de red para estabilizar el suministro y mejorar la eficiencia del sistema.

La transición energética también ha estado respaldada por reformas legales y paquetes de políticas integrales, diseñados para alinear los objetivos nacionales con los compromisos internacionales de sostenibilidad. Lin et al. (2020) comparan el caso de Japón con Taiwán, destacando las similitudes en la implementación de marcos regulatorios robustos y en la promoción de inversiones en infraestructura renovable.

2.5.4 Otros casos relevantes: China y Noruega

En China, la transición energética se ha centrado en la modernización de la red eléctrica y el incremento de capacidad renovable. J. Yuan et al. (2012) subrayan que el gobierno chino ha adoptado un enfoque top-down para promover la descarbonización mediante inversiones sustanciales en tecnologías avanzadas.

Por su parte, Noruega ha implementado estrategias para integrar energías renovables en su red eléctrica, enfrentando desafíos relacionados con la gobernanza de sistemas complejos. Bauknecht et al. (2020) destacan cómo el país ha abordado los problemas de gobernanza en el contexto de cambios sistémicos.

2.5.5 Comparación de los casos de estudio

Estos estudios de caso ilustran cómo diferentes países han abordado la transición energética según sus contextos específicos. En Estados Unidos, el enfoque ha sido predominantemente impulsado por la innovación tecnológica y el apoyo financiero a través de políticas públicas. En contraste, Alemania ha adoptado una estrategia más integral, integrando consideraciones socioeconómicas y ambientales en sus marcos políticos. Por su parte, Japón ha combinado herramientas de simulación con reformas legales para superar los desafíos relacionados con la intermitencia y la seguridad energética.

Adicionalmente, los casos de China y Noruega destacan la importancia de enfoques adaptativos y colaborativos en la gobernanza y en el diseño de sistemas energéticos sostenibles.

3 Metodología

El presente capítulo desarrolla la metodología aplicada en esta investigación para analizar y optimizar el sistema eléctrico nacional de México, integrando criterios económicos, ambientales y técnicos. Este enfoque responde a la creciente necesidad de transitar hacia un modelo energético sostenible que equilibre la satisfacción de la demanda energética, la mitigación del impacto ambiental y la reducción de costos.

El capítulo se estructura en varias secciones que incluyen: una descripción del enfoque metodológico y tipo de investigación, los modelos matemáticos utilizados, las herramientas computacionales aplicadas, la selección y procesamiento de datos relevantes, y consideraciones éticas y limitaciones del estudio. Además, se presentan gráficas y tablas que sustentan visualmente los argumentos y hallazgos clave.

La metodología utilizada en este estudio es predominantemente cuantitativa. Esto se fundamenta en el uso de modelos matemáticos y herramientas computacionales que permiten procesar grandes volúmenes de datos relacionados con el sistema eléctrico nacional. Los resultados obtenidos son evaluados mediante indicadores numéricos, como el Costo Total Anual (TAC) y el Eco-Indicador 99 (ECO99). Este enfoque cuantitativo se complementa con un análisis cualitativo limitado, enfocado en interpretar los hallazgos desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental y social.

Este enfoque permite abordar preguntas específicas relacionadas con la sostenibilidad y eficiencia del sistema eléctrico, como: ¿Qué combinación de tecnologías resulta óptima para reducir emisiones y costos? ¿Cuáles son las implicaciones ambientales de diferentes estrategias de generación? Estas preguntas guían la estructura metodológica, enfatizando la importancia de modelos robustos y datos confiables.

El sistema eléctrico mexicano enfrenta retos complejos derivados de la creciente demanda de energía eléctrica, proyectada para aumentar significativamente en las próximas décadas. Este incremento plantea la necesidad de planificar un sistema que no solo garantice el suministro, sino que también sea eficiente, resiliente y sostenible.

La proyección de la demanda eléctrica nacional, presentada en la **Figura 1**, permite visualizar el incremento constante en el consumo esperado para los próximos años. Este análisis fundamenta la necesidad de diseñar una metodología capaz de prever este crecimiento y asegurar el abastecimiento energético. A través de estas proyecciones del Centro Nacional de Control de Energía (Secretary of Energy, 2024), se puede identificar la urgencia de implementar modelos matemáticos y estrategias que soporten la sostenibilidad del sistema eléctrico.

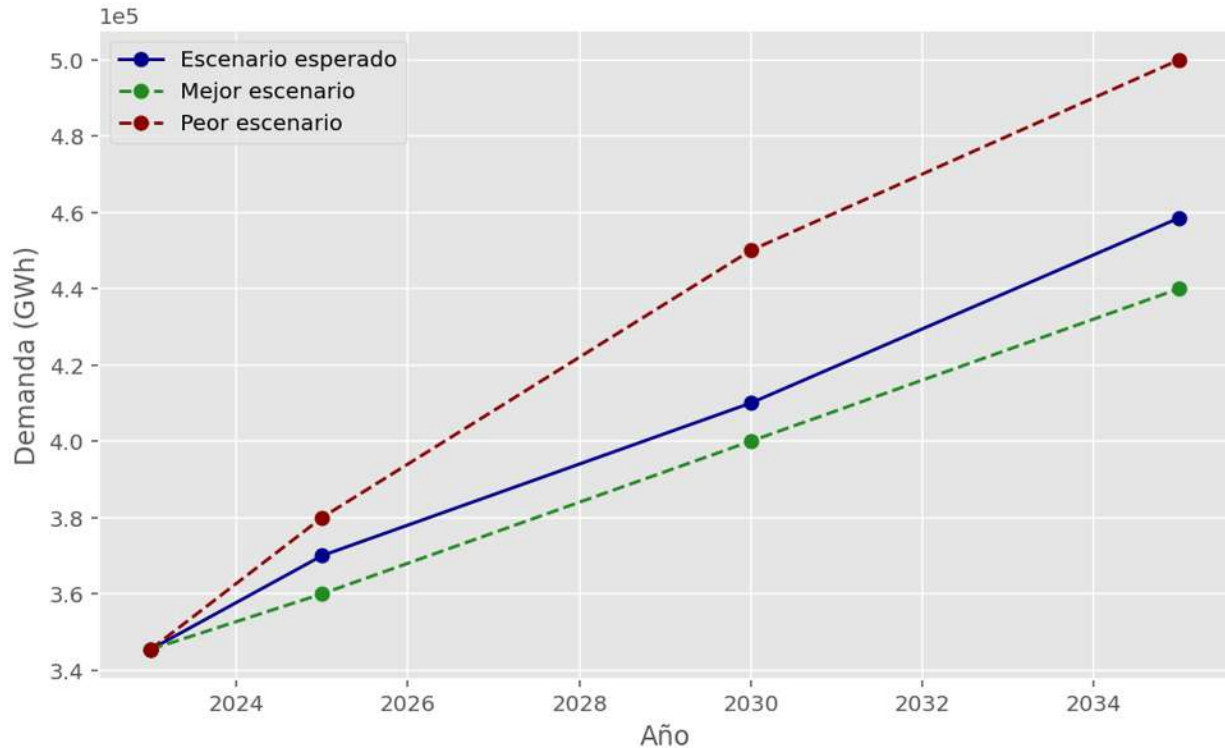


Figura 1. Proyección de la demanda eléctrica nacional en GWh.

Esta creciente demanda también intensifica los retos relacionados con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de recursos como agua y suelo. Las energías renovables emergen como una solución viable, aunque requieren una inversión significativa en tecnologías y actualizaciones de infraestructura.

Además, el contexto global de transición energética y los compromisos internacionales de México en acuerdos como el Acuerdo de París subrayan la necesidad de metodologías que integren criterios de sostenibilidad. La optimización de la matriz energética nacional no solo responde a una necesidad económica, sino también a un imperativo ambiental.

3.1 Modelos matemáticos y herramientas computacionales

El modelo desarrollado integra un enfoque multiobjetivo que busca minimizar simultáneamente el Costo Total Anual (TAC), las emisiones de CO2 equivalente (TEM)

y los impactos ambientales cuantificados mediante el ECO99. Estas funciones objetivo se formulan de la siguiente manera:

1. **Minimización del TAC:** Considera costos de inversión, operación, mantenimiento y transporte de energía. Esto incluye tanto plantas existentes como nuevas instalaciones.
2. **Reducción de emisiones (TEM):** Basada en factores de emisión por tecnología y tipo de combustible, considerando emisiones directas e indirectas.
3. **Evaluación del ECO99:** Un indicador robusto que incorpora daños a la salud humana, ecosistemas y recursos, proporcionando un enfoque integral de sostenibilidad ambiental.

El análisis comparativo entre tecnologías renovables y no renovables, presentado en la **Figura 2**, evidencia diferencias significativas en las emisiones de CO₂eq asociadas a cada fuente. Según datos de Ecolnvent (2024), las energías renovables como la solar y eólica tienen un impacto ambiental notablemente menor que las fuentes fósiles. Esto resalta la importancia de incluir estas tecnologías en el diseño metodológico para alcanzar objetivos climáticos, siendo un aspecto esencial en la optimización del sistema eléctrico.

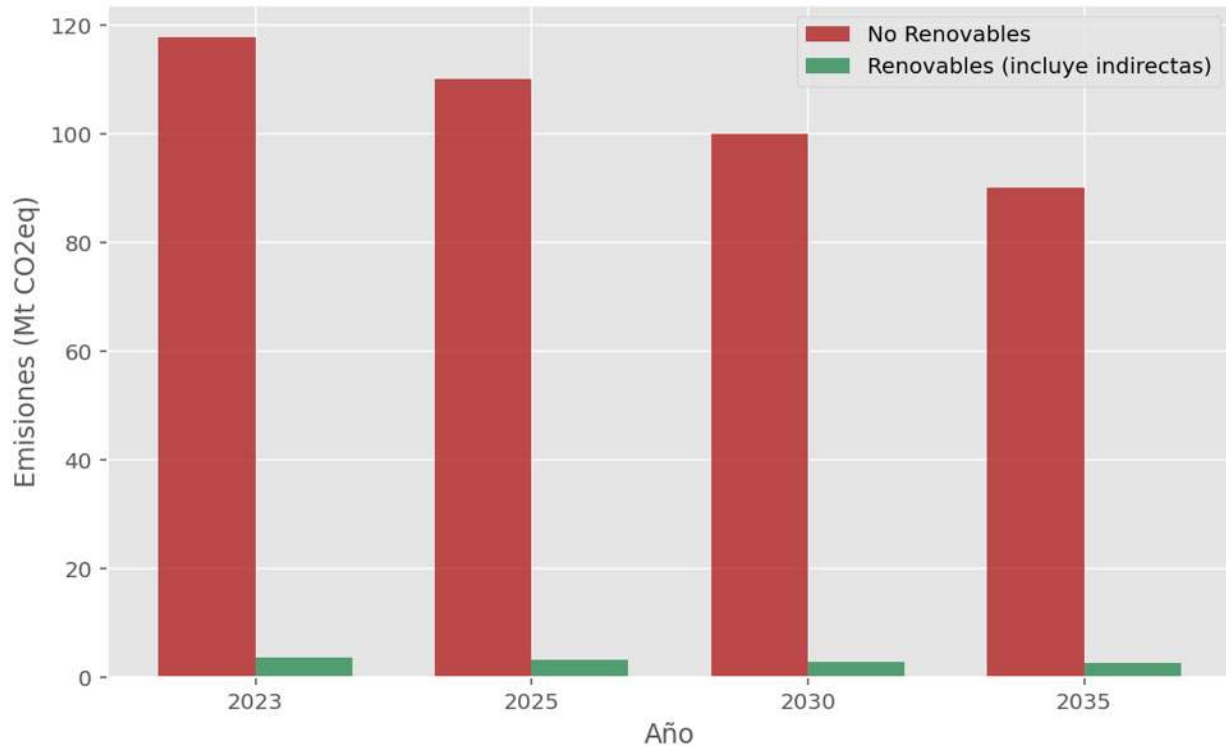


Figura 2. Comparación de emisiones entre tecnologías renovables y no renovables.

La metodología también considera restricciones operativas y límites de capacidad. Por ejemplo, se modelan escenarios donde ciertas tecnologías tienen disponibilidad limitada debido a restricciones geográficas o climáticas. Estas restricciones fortalecen la validez del modelo al reflejar las condiciones reales del sistema eléctrico mexicano.

3.2 Herramientas computacionales

El software GAMS fue seleccionado para implementar el modelo debido a su capacidad para manejar problemas de optimización complejos. Este entorno permite definir ecuaciones algebraicas de forma estructurada y resolverlas mediante el solucionador CPLEX, ampliamente reconocido en la comunidad de investigación. Además, la integración de datos con Ecolnvent (Ecolnvent v3.11) garantiza una evaluación robusta de los impactos ambientales asociados a las tecnologías consideradas.

El uso de GAMS y CPLEX se valida mediante su amplio uso en estudios previos de optimización de sistemas eléctricos. Además, se realizaron pruebas de sensibilidad para

garantizar que las soluciones obtenidas sean estables frente a variaciones en los datos de entrada, como precios de combustibles o demanda eléctrica.

Los datos empleados en este estudio provienen de diversas fuentes confiables, incluyendo:

- **Demanda eléctrica:** Proyecciones del Centro Nacional de Control de Energía.
- **Factores ambientales:** Datos del ciclo de vida de EcoInvent, que incluyen emisiones, consumo de agua y otros impactos asociados a cada tecnología.
- **Capacidades de generación:** Datos de plantas existentes y propuestas, desglosados por tecnología y región.

El mix energético nacional, visualizado en la **Figura 3**, muestra cómo las fuentes renovables han ganado participación en las últimas décadas. Esto se presenta mediante un gráfico de áreas apiladas, ilustrando la evolución de fósiles y renovables.

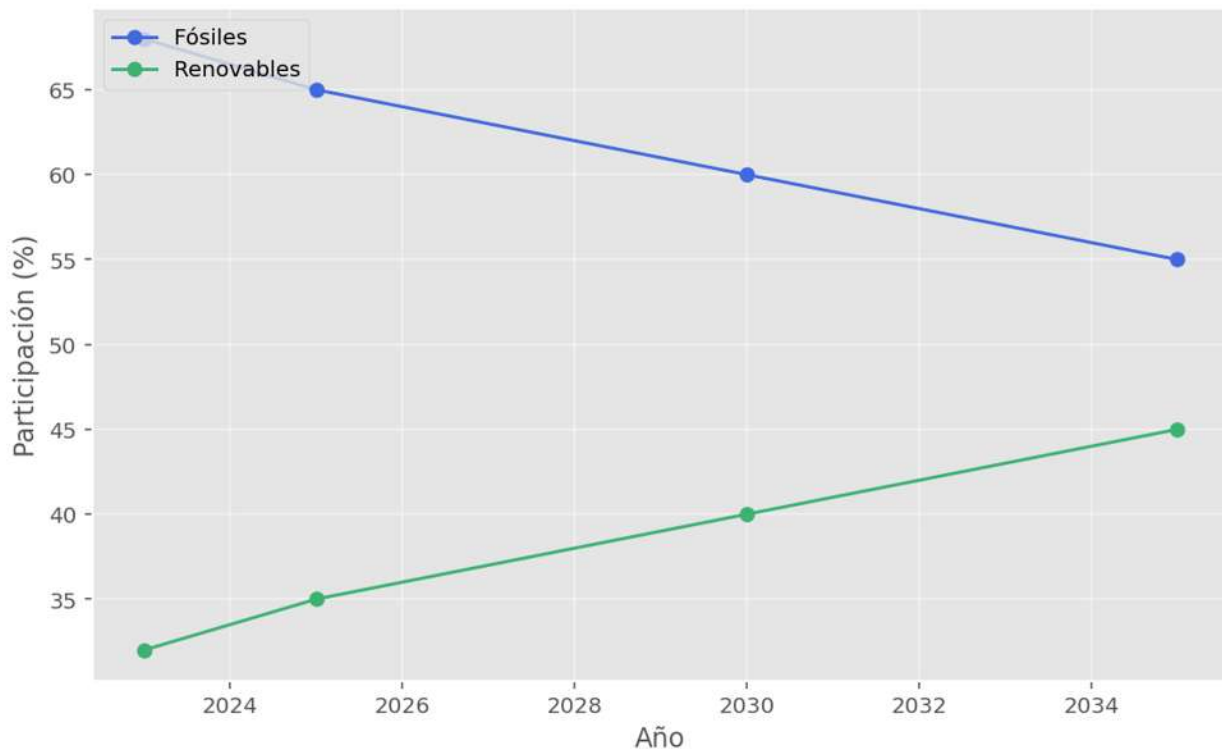


Figura 3. Evolución de la participación de fuentes fósiles y renovables.

La participación de las diferentes tecnologías renovables en el mix energético, representada en la **Figura 4**, proporciona un análisis más detallado sobre la distribución de tecnologías como solar, eólica, geotérmica, biomasa e hidráulica. Este gráfico radial destaca la evolución de estas tecnologías en función de los años analizados, lo que facilita identificar tendencias clave en la transición energética.

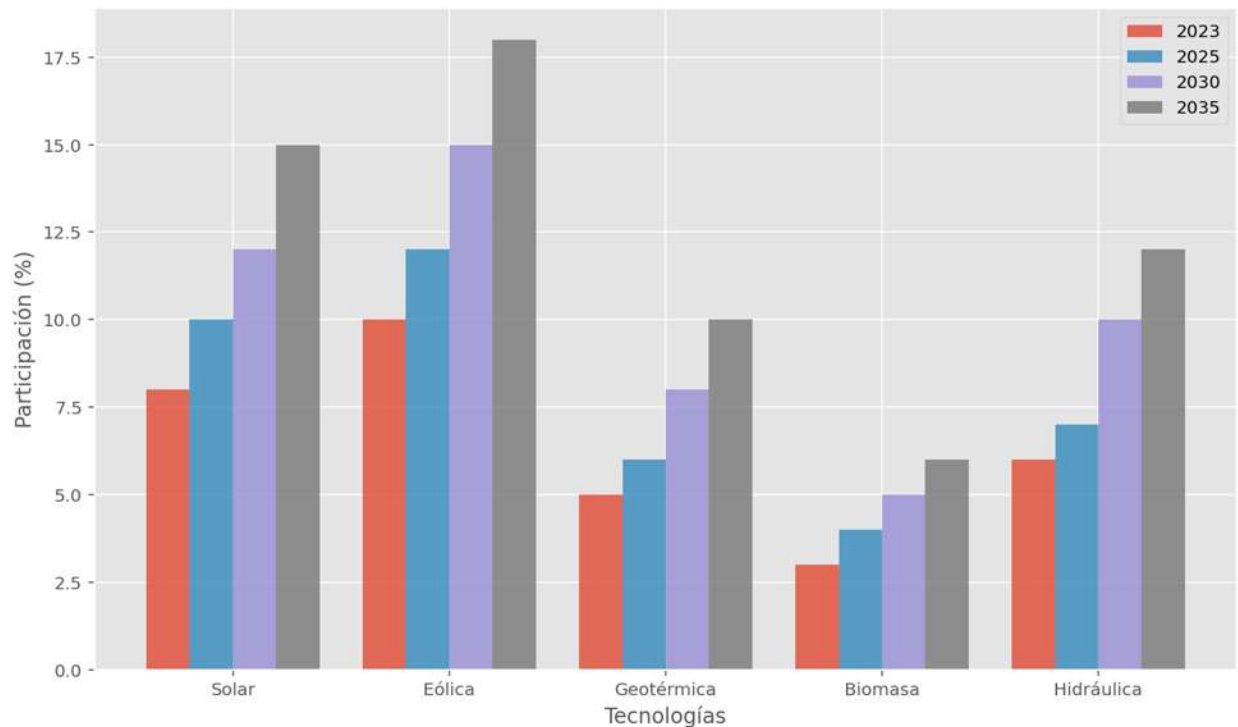


Figura 4. Participación de tecnologías renovables por año.

El procesamiento de estos datos incluyó ajustes para garantizar su consistencia y relevancia. Por ejemplo, se realizaron interpolaciones para completar series de datos faltantes y se adaptaron factores de emisión para reflejar condiciones específicas del sistema eléctrico mexicano.

El desarrollo de esta investigación también consideró aspectos éticos y limitaciones inherentes al estudio. Entre los puntos destacados se encuentran:

1. **Transparencia en los datos:** Se garantizó el uso de fuentes confiables y datos actualizados para asegurar la validez de los resultados.

2. **Imparcialidad:** El análisis de tecnologías no favoreció ninguna en particular, evaluándolas exclusivamente en función de criterios técnicos, económicos y ambientales.
3. **Limitaciones de los modelos:** Los modelos matemáticos empleados presentan ciertas restricciones inherentes, como la simplificación de escenarios complejos, la dependencia de datos históricos y la dificultad para prever eventos inesperados como crisis políticas o económicas.
4. **Impacto social:** Se evaluaron los posibles efectos negativos de las decisiones en comunidades vulnerables, priorizando tecnologías que minimicen dichos impactos.

Además, se reconocen limitaciones relacionadas con la disponibilidad y calidad de los datos. Aunque se utilizaron fuentes reconocidas como el CENACE y EcoInvent, es posible que ciertos aspectos no estén completamente representados, como variaciones regionales específicas o fluctuaciones en la eficiencia de las tecnologías a lo largo del tiempo.

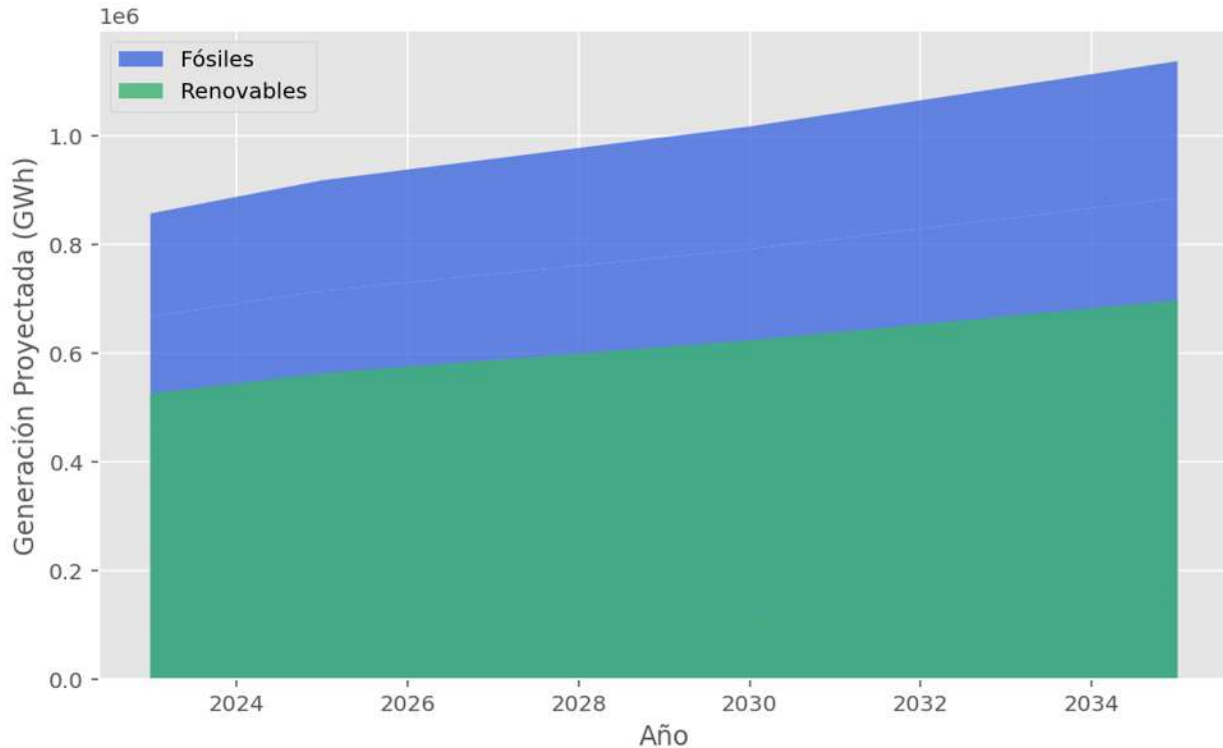


Figura 5. Pronóstico de crecimiento de la generación eléctrica, clasificado por el origen de la energía.

La **Figura 5**, permite visualizar la transición hacia un sistema energético más limpio y eficiente. Este crecimiento proyectado destaca la relevancia de integrar modelos multiobjetivo en la metodología, considerando tanto los beneficios ambientales como los económicos para orientar la planificación estratégica. En conjunto, las herramientas y modelos descritos en este capítulo establecen las bases para un análisis profundo de escenarios futuros y soluciones sostenibles en el sector eléctrico nacional.

3.3 Fundamentos teóricos

En este apartado, se establecen los conceptos fundamentales que sustentan la metodología empleada en esta investigación, con énfasis en el balance energético, la reducción de emisiones y la sostenibilidad. Estos pilares teóricos no solo guían el análisis del sistema eléctrico nacional, sino que también permiten evaluar la interacción entre los componentes económicos, ambientales y técnicos del sistema.

3.3.1 Balance energético

El balance energético en sistemas eléctricos es el principio que garantiza que la energía generada en cada región del sistema sea suficiente para satisfacer la demanda en todos los momentos y lugares. Este concepto es esencial en la planificación de sistemas eléctricos, donde la generación, el transporte y el consumo deben estar coordinados para evitar deficiencias o excedentes. Un balance eficiente no solo asegura la estabilidad del sistema, sino que también optimiza el uso de recursos y minimiza costos operativos.

En el caso del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de México, el balance energético se enfrenta a desafíos significativos debido a las características geográficas del país y la diversidad de sus regiones de control. De acuerdo el análisis realizado por Mora-Jacobo et al. (2023) las regiones aisladas como Baja California y Baja California Sur presentan dificultades particulares en el acceso a recursos renovables y la interconexión con el resto del sistema. Esto subraya la importancia de optimizar la generación y transmisión de energía en estas zonas para reducir pérdidas y asegurar un suministro constante.

La **Figura 6** muestra un esquema general de cómo se logra el balance energético en una región típica, considerando generación local, importaciones, exportaciones y pérdidas por transmisión.

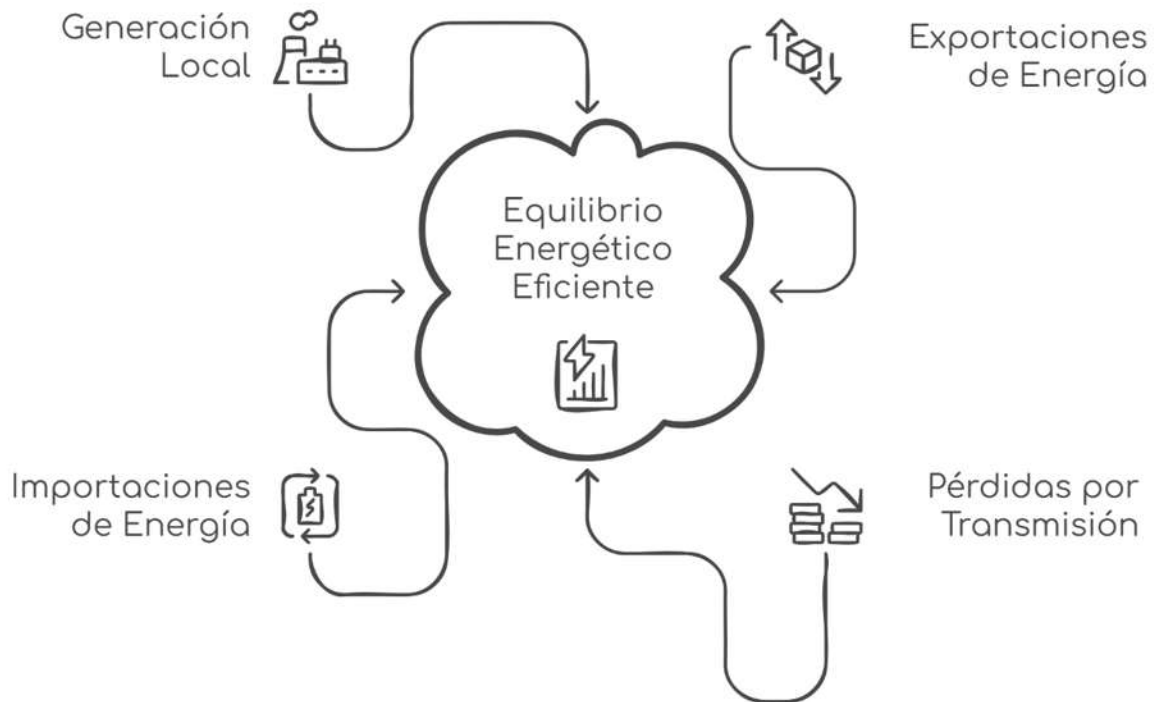


Figura 6. Esquema del balance energético en un sistema típico.

Este balance requiere modelos matemáticos complejos que incorporen restricciones como capacidades máximas de generación y transmisión, factores de conversión energética y coeficientes de pérdidas, todos los cuales han sido incluidos en el modelo desarrollado en este proyecto. Además, es fundamental considerar que las pérdidas en transmisión pueden variar considerablemente dependiendo de la infraestructura disponible y la distancia entre los centros de generación y consumo.

3.3.2 Reducción de emisiones

La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es un objetivo clave en la transición hacia un sistema eléctrico sostenible. Según datos del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Secretary of Energy, 2024), México genera una proporción significativa de sus emisiones a partir de plantas de combustibles fósiles, como las de gas natural y carbón. Estas emisiones se ven amplificadas por la creciente

demanda eléctrica, lo que resalta la necesidad de integrar fuentes de energía con menor huella de carbono.

La transición hacia energías renovables, aunque prometedora, también requiere un análisis integral que considere las emisiones indirectas asociadas con la fabricación, transporte e instalación de los equipos. Este estudio incluye tanto emisiones directas como indirectas para proporcionar una visión completa del impacto ambiental de cada tecnología.

Estas estimaciones, basadas en factores de emisión específicos y análisis de ciclo de vida, subrayan la importancia de considerar todo el ciclo de vida de las tecnologías. Por ejemplo, mientras que las energías renovables como la solar y la eólica tienen emisiones operativas cercanas a cero, su fabricación e instalación contribuyen a emisiones indirectas que no pueden ser ignoradas en un análisis integral.

3.3.2.1. Estrategias para reducir emisiones

Para abordar estos desafíos, se implementaron las siguientes estrategias:

1. **Incrementar la participación de energías renovables:** Tecnologías como la solar, eólica e hidráulica tienen factores de emisión significativamente menores que los combustibles fósiles.
2. **Mejorar la eficiencia energética:** La modernización de plantas existentes y la optimización de procesos de transmisión y distribución pueden reducir considerablemente las emisiones.
3. **Fomentar la investigación y desarrollo:** El avance en tecnologías de almacenamiento de energía y redes inteligentes permite maximizar el uso de renovables.

3.3.3 Sostenibilidad

La sostenibilidad en sistemas eléctricos implica un equilibrio entre los objetivos económicos, ambientales y sociales. En el contexto de este estudio, la sostenibilidad se aborda mediante la implementación de herramientas de optimización que permiten

evaluar el costo total anual (TAC), las emisiones totales (TEM), y el puntaje ECO99. Este enfoque garantiza que las decisiones en la planificación energética consideren tanto el bienestar presente como las necesidades futuras.

(Posadas-Paredes et al., 2024) resalta cómo estrategias como la expansión de plantaciones forestales pueden complementar el desarrollo del sistema eléctrico, proporcionando servicios ecosistémicos y reduciendo emisiones de CO₂. Estas iniciativas reflejan la necesidad de integrar soluciones basadas en la naturaleza en la planificación energética. En el contexto del desarrollo sostenible, la adopción de energías renovables juega un papel fundamental. La **Figura 7** resume las principales ventajas y desventajas de esta transición energética.



Figura 7. Impactos positivos y negativos de la adopción de energías renovables.

Además, se han considerado métricas específicas como el consumo de agua y el uso de tierra para evaluar de manera más precisa el impacto de las tecnologías en el medio ambiente y las comunidades locales.

3.4 Herramientas y modelos

El uso de herramientas computacionales como GAMS, junto con bases de datos robustas como EcoInvent, ha sido esencial para modelar y evaluar las estrategias descritas. Estos modelos permiten simular diferentes escenarios, considerando restricciones técnicas y objetivos múltiples, y generan soluciones óptimas que pueden ser implementadas en políticas públicas.



Figura 8. Esquema de herramientas para el análisis, modelado y optimización orientados a objetivos.

En el contexto de la transición hacia sistemas eléctricos sostenibles, los modelos matemáticos juegan un papel esencial al proporcionar herramientas para la optimización y planificación de redes complejas. Estos modelos permiten analizar las interacciones entre las distintas regiones del sistema, considerando factores como la generación de energía, el transporte, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los costos asociados y el consumo de recursos críticos como el agua y la tierra.

El modelo utilizado en este estudio fue diseñado específicamente para abordar los retos del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de México, que enfrenta una creciente demanda de energía y una urgente necesidad de reducir su impacto ambiental. La metodología empleada combina enfoques tradicionales con herramientas innovadoras que incorporan indicadores ambientales avanzados como el **ECO-99**. Este indicador permite evaluar de manera integral los impactos sobre la salud humana, la calidad del ecosistema y el uso de recursos, brindando así una visión multidimensional de la sostenibilidad.

El modelo se centra en la optimización multiobjetivo, lo que implica satisfacer la demanda eléctrica nacional minimizando simultáneamente el Costo Total Anual (TAC), las emisiones totales de GEI (TEM) y los impactos medidos por el ECO-99. Este enfoque garantiza que las decisiones en infraestructura y generación no solo sean económicamente viables, sino también ambientalmente responsables.

3.5 Propósito y objetivos del modelo

El propósito del modelo matemático es ofrecer una herramienta robusta para la toma de decisiones en la planificación y gestión del SEN, considerando tanto las condiciones actuales como proyecciones futuras. Los objetivos principales del modelo incluyen:

1. Optimizar la distribución de recursos energéticos:

- Maximizar la eficiencia de las plantas generadoras existentes.
- Planificar la instalación de nuevas plantas y líneas de transmisión.
- Reducir las pérdidas de energía en producción y transmisión.

2. Reducir el impacto ambiental:

- Minimizar las emisiones de CO₂eq generadas por las plantas.
- Evaluar el impacto total a través del ECO-99.
- Incorporar el uso de energías renovables para reemplazar fuentes no renovables.

3. **Garantizar la sostenibilidad hídrica y territorial:**

- Analizar el consumo de agua asociado a las tecnologías de generación.
- Considerar las limitaciones de uso de tierra y la posibilidad de implementar plantaciones forestales para capturar carbono.

4. **Evaluar costos y beneficios socioeconómicos:**

- Minimizar los costos de inversión, operación y mantenimiento.
- Maximizar los beneficios sociales mediante programas como “Sembrando Vida”.

3.5.1 Descripción general del modelo

El modelo está estructurado para analizar de manera integral el SEN. Divide el sistema en regiones de control que representan diferentes zonas geográficas con demandas energéticas específicas y capacidades de generación particulares. Estas regiones están interconectadas a través de líneas de transmisión que permiten el flujo de energía entre ellas, considerando las pérdidas por transmisión y las capacidades límite de las líneas existentes y nuevas.

3.5.2 Elementos principales del modelo

1. **Regiones de control:** Representan las zonas del SEN, incluyendo regiones aisladas como Baja California y Baja California Sur, donde las limitaciones de interconexión imponen retos particulares.

2. **Plantas de generación:** Incluyen tanto instalaciones existentes como nuevas, clasificadas según tecnologías (fotovoltaica, eólica, biomasa, etc.) y tipos de combustibles (renovables y no renovables).
3. **Líneas de transmisión:** Infraestructura clave para garantizar el flujo eficiente de energía, minimizando pérdidas y costos.
4. **Periodos de tiempo:** El modelo se analiza en escalas mensuales, lo que permite capturar variaciones estacionales en la generación y demanda.
5. **Indicadores ambientales:** El ECO-99 se utiliza para evaluar el impacto ambiental global, mientras que las emisiones de CO₂eq se analizan de manera separada.

3.5.3 Factores considerados

El modelo considera una serie de factores críticos que influyen en la planificación y optimización del SEN:

- **Demanda energética regional:** Proyecciones futuras basadas en el crecimiento demográfico e industrial.
- **Capacidades tecnológicas:** Factores de eficiencia, capacidad máxima y mínima de generación para cada tecnología.
- **Factores de emisión:** Asociados a cada tipo de combustible y tecnología de generación.
- **Uso de recursos:** Consumo de agua, uso de tierra y captación de carbono mediante plantaciones forestales.
- **Costos:** Incluyen inversión en nuevas infraestructuras, operación y mantenimiento, y transporte de energía.

3.5.4 Implementación del modelo

El modelo fue implementado utilizando el software **GAMS** (Ferris, 1999a), una herramienta ampliamente reconocida para resolver problemas de optimización. GAMS

permite integrar una gran cantidad de variables, restricciones y ecuaciones, ofreciendo soluciones óptimas bajo diferentes escenarios.

3.5.5 Datos y herramientas complementarias

1. Bases de datos de ciclo de vida:

- **EcolInvent:** Proporciona factores de emisión y consumo de recursos para las tecnologías de generación.
- **SimaPro:** Se utilizó para calcular el ECO-99, integrando datos ambientales detallados.

2. Información nacional:

- Datos del Sistema Eléctrico Nacional, incluyendo capacidades de generación, ubicación de plantas, y consumo de energía.
- Información sobre programas gubernamentales como “Sembrando Vida”, que ofrece incentivos para la reforestación y captación de carbono.

3. Escenarios de análisis:

- Escenario actual (2022): Evaluación de la situación presente del SEN.
- Proyección a 2030: Análisis de diferentes combinaciones de tecnologías y estrategias para satisfacer la demanda futura.

3.5.6 Características destacadas

El modelo incorpora innovaciones clave para abordar la complejidad del SEN:

- **Multiobjetivo:** Combina la minimización de TAC, TEM y ECO-99, equilibrando objetivos económicos y ambientales.
- **Análisis de interconexiones:** Evalúa los beneficios de conectar regiones aisladas mediante nuevas líneas de transmisión.
- **Flexibilidad tecnológica:** Permite seleccionar las mejores tecnologías según las características de cada región.

- **Evaluación del impacto hídrico:** Considera el consumo de agua en todas las etapas de generación y transmisión.

3.5.7 Aplicaciones

La implementación de este modelo ofrece numerosas aplicaciones prácticas y beneficios potenciales:

1. Planificación estratégica:

- Identificar las mejores ubicaciones para nuevas plantas y líneas de transmisión.
- Determinar combinaciones óptimas de tecnologías para satisfacer la demanda regional.

2. Reducción de impactos ambientales:

- Cuantificar los beneficios de sustituir plantas de combustibles fósiles por energías renovables.
- Estimar la reducción en emisiones de CO₂eq y en el impacto global medido por el ECO-99.

3. Toma de decisiones informada:

- Proporcionar a los responsables políticos y empresariales herramientas para evaluar escenarios de inversión.
- Incorporar objetivos de sostenibilidad en la planificación energética.

4. Cumplimiento de objetivos nacionales e internacionales:

- Contribuir al cumplimiento de las metas del Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).
- Fortalecer la seguridad energética nacional mediante el uso de recursos renovables.

4 Justificación

Los combustibles fósiles son la principal fuente de energía en el mundo, y uno de los principales motivos del calentamiento global, cada vez es más frecuente las catástrofes por dicho motivo. La necesidad de tener un sistema eléctrico sustentable ha motivado el uso de fuentes de energía renovables, que debe fomentar la inversión en unidades con recursos renovables. Actualmente existe un potencial desarrollo de las fuentes de energía renovables, donde el proceso de transformación representa uno de las más importantes. Sin embargo, las cadenas de suministro analizadas, a pesar de lograr satisfacer la demanda de energía, así como el beneficio económico de la región, no han logrado una planeación óptima del sistema energético, tomando en cuenta la mejora de indicadores ambientales, minimizar el consumo total de agua por la cadena de suministro de energía, los costos totales, así como la distribución adecuada e implementación de almacenamiento de energía con el objetivo de encontrar soluciones factibles observando las tendencias de los escenarios analizados y representan opciones considerables para la planificación del sistema energético.

5 Caso de estudio

Para mostrar la aplicabilidad del modelo propuesto en un sistema a gran escala, este trabajo presenta diversos análisis para el sistema eléctrico nacional de México, tomando en cuenta las instalaciones generadoras de energía, las emisiones, el consumo de agua y los costos. El objetivo es encontrar un equilibrio entre estos objetivos en diferentes momentos para satisfacer la demanda energética. Este proyecto de investigación aborda la planificación estratégica como base para una transición energética sostenible que implica diversas escalas y una reconfiguración óptima de la infraestructura disponible.

El sistema de generación, distribución y suministro de energía eléctrica en México se denomina Sistema Eléctrico Nacional (SEN). El SEN está conformado por cuatro sistemas eléctricos aislados: el Sistema Interconectado Nacional (SIN), que constituye la gran red eléctrica del país, el Sistema Eléctrico de Baja California (BC), el Sistema Eléctrico Baja California Sur (BCS) y el Sistema Eléctrico Mulegé (SEM). La SEN está conformada por 10 regiones de control, de las cuales 7 están interconectadas formando

el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las tres restantes están aisladas. Se espera que las tres regiones de control, Baja California, Baja California Sur y Mulegé, aisladas eléctricamente del resto de la red eléctrica, estén interconectadas al SIN hasta 2023 y 2024, respectivamente (SENER, 2020). En el presente trabajo se tuvieron en cuenta 9 regiones de control (ver **Figura 9**), la región de control de Mulegé fue descartada debido a la baja participación en la generación, demanda, pérdidas y distribución de energía.



Figura 9. Límites del Sistema de Energía Eléctrica (regiones de control) y la demanda de energía eléctrica en cada región.

5.1 Interconexiones transfronterizas

Existen trece interconexiones internacionales en México con América del Norte y Central (ver **Figura 10**), de las cuales once están en la frontera con los Estados Unidos de América y dos con América Central (SENER, 2020).

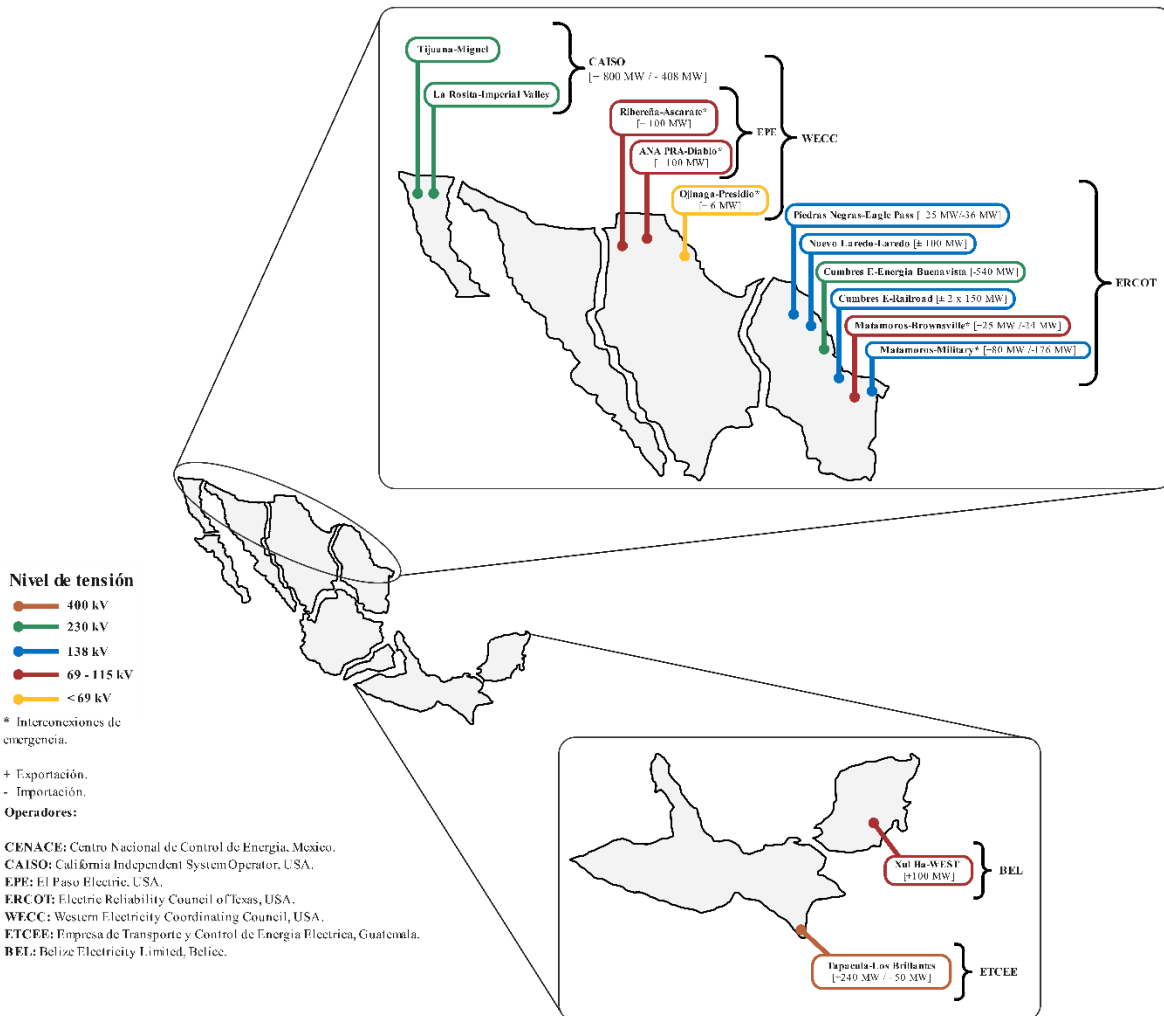


Figura 10. Capacidad de las líneas transfronterizas de transferencia de energía eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional y operadores.

5.2 Interconexiones con América del Norte

Hay cinco interconexiones de emergencia a lo largo de la frontera, que son:

- 1) Ribereña-Ascárate
- 2) ANAPRA-Diablo
- 3) Ojinaga-Presidio
- 4) Matamoros-Brownsville
- 5) Matamoros-Militares

Asimismo, seis interconexiones permanentes permiten la exportación e importación de energía eléctrica, dos ubicadas entre Baja California, México y California, Estados Unidos de América, una entre Coahuila y Texas, y tres entre Tamaulipas y Texas:

6) Tijuana-Miguel

7) La Rosita-Valle Imperial

8) Piedras Negras-Eagle Pass

9) Nuevo Laredo-Laredo

10) Cumbres F.-Planta Frontera

11) Cumbres F.-Ferrocarril

5.3 Interconexiones con Centroamérica

Existen dos interconexiones internacionales con Centroamérica (ver **Figura 10**), una se encuentra en Quintana Roo y conecta con Belice, y la otra se encuentra en Chiapas e interconecta con Guatemala:

12) Xul Ha-Oeste

13) Tapachula-Los Brillantes

5.4 Regiones de transmisión

Las actividades de transmisión y distribución de energía eléctrica se consideran áreas estratégicas y están reservadas para el Estado mexicano. El Sistema Eléctrico Nacional está conformado por una Red Nacional de Transmisión (NTN) distribuida por todo el territorio. La NTN se agrupa en cincuenta y tres regiones de transmisión, de las cuales cuarenta y cinco están interconectadas, conformando un total de sesenta y tres enlaces en el SIN (ver **Figura 11**); las seis restantes pertenecen a los sistemas aislados de la Península de Baja California, siete están interconectadas y conforman seis enlaces en total.

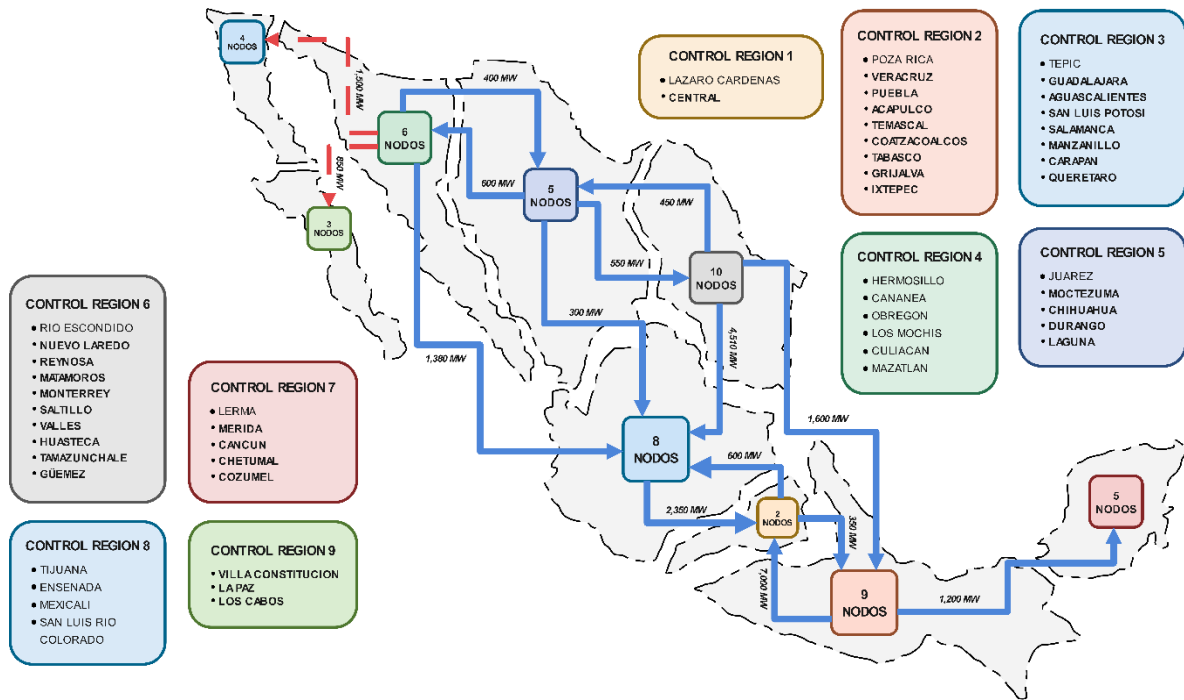


Figura 11. Interacción entre regiones de control, capacidad de las líneas de transmisión de energía eléctrica existentes y nuevas del Sistema Eléctrico Nacional.

5.5 Capacidad de las líneas de transmisión

El sistema eléctrico nacional cuenta con 68 líneas de transmisión que varían en su capacidad, hay cuatro capacidades diferentes en estas 68 líneas, que son de 1 a 499 MW, de 500 a 999 MW, de 1000 a 1500 MW y más de 1500 MW. Las líneas de transmisión más importantes se encuentran en la región de control Oriental, Occidental, Central y Noreste. Sin embargo, a pesar de tener 68 líneas de transmisión, solo hay 17 líneas de transmisión entre las regiones de control, las que tienen la mayor capacidad desde la región de control oriental hasta la central con 3000 MW y 4000 MW. Las regiones aisladas que no cuentan con líneas de transmisión con ninguna otra región de control son Baja California, Baja California Sur y Mulegé, en este proyecto se analizará la conexión de estas regiones de control en el sistema eléctrico nacional.

Las pérdidas de energía eléctrica en la distribución representan un gran tema de interés que debe ser considerado en la generación de energía en el Sistema Eléctrico Nacional, las pérdidas de energía se clasifican en dos ramas: técnicas y no técnicas. El primero es

causado por sobrecarga o calentamiento de los sistemas de distribución y transformación, pérdidas no técnicas derivadas de usos ilegales, errores de medición y fallas de medición. En 2016, México registró un porcentaje de 5.98% de pérdidas técnicas del total de energía generada en el Sistema Eléctrico Nacional, mientras que las pérdidas no técnicas se estimaron en 7.87% del total de energía producida. Reducir las pérdidas de energía puede generar beneficios para la generación de fuentes de energía renovables, generar ingresos para ellas y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (CENACE, 2019).

5.6 Demanda energética

El consumo de energía eléctrica por región de control y por año se puede observar en la **Tabla 1**, donde se muestra el consumo por parte del Sistema Interconectado Nacional de la misma manera que el consumo de todo el Sistema Eléctrico Nacional. Cabe destacar que la región control que más consumo aportó fue la región control Occidental con 21.5% del total (ver **Figura 9**), seguida de la región Control Central con 19.59%, luego la región control Noreste con 18.18% y el control que menos energía consume fue la región Baja California Sur con 0.86%, seguido de la región peninsular con un 3,9%.

Tabla 1. Distribución mensual de la demanda eléctrica para 2020, 2025 y 2030.

<i>Regiones de control</i>	<i>Demanda 2020 (GWh)</i>	<i>Demanda 2025 (GWh)</i>	<i>Demanda 2030 (GWh)</i>
1	57,371.57	63,417	69,531
2	50,385.56	58,288	65,962
3	68,085.85	78,920	91,692
4	26,077.90	29,206	32,979
5	29,261.71	33,683	37,724
6	54,184.76	65,764	77,353
7	12,484.50	16,095	19,225
8	14,923.06	17,528	20,294

9	2,719.28	3,288	3,848
---	----------	-------	-------

Las demandas energéticas que se consideran para este modelo fueron tomadas del Programa Nacional de Desarrollo del Sistema Eléctrico. Sin embargo, los datos para las perspectivas de 2025 y 2030 se consideran a través del Sistema de Información Energética. Según las perspectivas realizadas por (SENER, 2018), la **Figura 12** muestra la distribución mensual de la demanda eléctrica para 2020, 2025 y 2030.

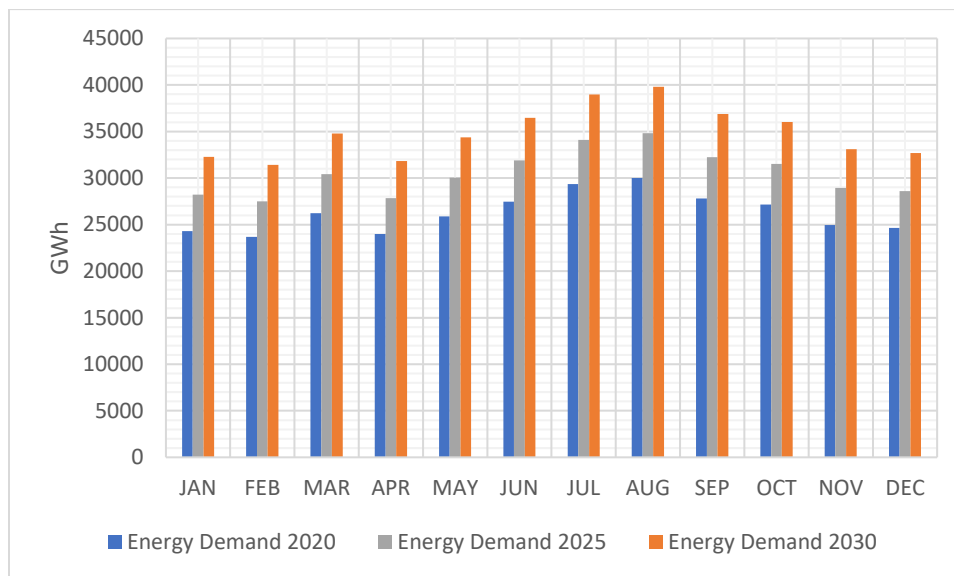


Figura 12. Demanda de energía eléctrica para 2020 y estimación de demanda de energía eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional para 2025 y 2030.

5.7 Centrales eléctricas

Los tipos de tecnología potencial considerados para ser instalados fueron bioenergía (gasificación de biomasa), carbón, ciclo combinado, cogeneración eficiente, geotérmica, hidroeléctrica, combustión interna, nuclear, fotovoltaica, termoeléctrica, turbogás y eólica (GeoComunes, 2021). Hay 187 plantas generadoras de energía consideradas para este proyecto, de las cuales 164 son plantas generadoras de energía existentes en el sistema energético y son elegibles en el país debido a su capacidad, ubicación, generación y vida útil restante. Las 23 centrales restantes surgen como propuesta para su implementación en el sistema energético, es decir, son nuevas instalaciones de generación de energía

para atender la demanda de energía en diferentes momentos, donde se tuvo en cuenta el potencial de explotación de recursos en las regiones de control, así mismo, la próxima instalación programada de algunas plantas generadoras de energía descritas en PRODESEN. Las instalaciones generadoras de energía propuestas son 2 plantas de biomasa, 5 ciclos combinados, 4 eólicas, 4 fotovoltaicas, 1 geotérmica, 1 central nuclear, 1 de combustión interna, 2 turbogas, 2 de cogeneración y 1 hidroeléctrica, por otro lado, se contempló la instalación y aumento de la capacidad de las líneas de transmisión para brindar sustentabilidad, seguridad y optimizar la distribución de energía en el Sistema Eléctrico Nacional.

5.8 Emisiones y consumo de agua

Las emisiones de gases de efecto invernadero consideradas dependen de la tecnología de las plantas generadoras de energía, así como de la capacidad de las centrales eléctricas, las emisiones promedio de gases de efecto invernadero en kg/MWh se reportan en el Programa Nacional de Desarrollo del Sistema Eléctrico (SENER, 2018). Además, (Feng et al., 2014) presentó un estudio para estimar la tendencia de las emisiones y el consumo de agua según las fuentes o recursos energéticos, cuyos datos se utilizaron para este proyecto.

El consumo de agua se define como el ciclo de vida, es decir, la cantidad neta de agua (extracción de agua menos descarga de agua) consumida a lo largo de la cadena de suministro para producir 1 kWh de electricidad (Asdrubali et al., 2015). Los datos sobre agua consumida reportados por Jin et al. fueron utilizados en este documento (Jin et al., 2019).

6 Formulación del modelo

El modelo matemático propuesto describe las tecnologías seleccionadas para satisfacer la demanda de energía de las regiones de control en el Sistema Eléctrico. En general, el modelo incorpora la instalación de nuevas líneas de transmisión de energía eléctrica y el aumento de la capacidad de las líneas de transmisión existentes para beneficiar la seguridad energética, el uso e instalación de unidades de generación de energía

control durante un período de tiempo ($gec_{i,t}$), más la energía enviada a otra región de control ($ges_{i,i1,t}$), más la energía enviada por las líneas de transmisión recién instaladas ($gesn_{i,i1,t}$), considerando, de la misma manera, las pérdidas que surgen en la producción de energía en cada región de control ($loste_{i,t}^{prod}$), más las pérdidas de transmisión en cada región de control durante un período de tiempo ($loste_{i,t}^{trans}$), donde se añade la energía exportada desde la región de control si hay una exportación de la región:

$$GEi_{i,t}^P = gec_{i,t} + \sum_{i1} ges_{i,i1,t} Zs_{i,i1} + \sum_{i1} gesn_{i,i1,t} + loste_{i,t}^{prod} + loste_{i,t}^{trans} + ee_{i,t} Z_i^{exp} \quad \forall i,t \quad (1)$$

Cabe señalar que debe haber una interconexión para enviar energía entre las regiones de control, que se modela a través de un parámetro binario ($Zs_{i,i1}$) que toma el valor de 1 cuando el sistema está interconectado y cero cuando el sistema no está conectado. Z_i^{exp} es un parámetro binario que es uno cuando la región i está interconectada con el proveedor externo, de lo contrario este parámetro binario es cero.

Además, es la suma de la energía producida $GEi_{i,t}^P$ por cada instalación generadora de energía j dentro de la región de control i .

$$GEi_{i,t}^P = \sum_j GEj_{i,j,t}^P \quad \forall i,t \quad (2)$$

6.2 Pérdidas de energía primaria debidas a la producción

En la producción de energía, una parte de esa energía se pierde en cada región de control i , durante el período t .

$$loste_{i,t}^{prod} = \sum_j GEj_{i,j,t}^P \phi_{i,j}^{lp} \quad \forall i,t \quad (3)$$

$\phi_{i,j}^{lp}$ son coeficientes que indican las pérdidas que se producen en las instalaciones de generación de energía según su tipo de tecnología.

6.3 Límite de energía exportada

La energía que se exporta a los agentes externos en el acuerdo está limitada por la capacidad máxima que soportan las líneas de transmisión, la exportación desde la región i al usuario externo en el tiempo t está limitada por:

$$ee_{i,t} \leq ee_{i,t}^{\text{cap}} \quad \forall i,t \quad (4)$$

6.4 Balance de la demanda de energía por región de control

La demanda de energía en cada zona i en cada período t debe satisfacerse con la energía generada en cada región de control durante un período de tiempo ($g ec_{i,t}$), la energía generada en cada región recibida de otra región representada por la energía enviada ($ges_{il,i,t}$ o $gesn_{i,il,t}$) menos las pérdidas de energía por transmisión siendo $\tau_{i,il}^{\text{let}}$ un coeficiente de pérdida de transmisión y donde Z_i^{imp} es un parámetro binario que toma el valor de 1 cuando el sistema está interconectado y cero cuando el sistema no está conectado, más las importaciones a la región en un período de tiempo ($ie_{i,t}$), donde $Z_{s_{il,i}}$ es un parámetro binario que es uno cuando la región i está interconectada con el proveedor externo, de lo contrario este parámetro binario es cero.

$$DE_{i,t} = g ec_{i,t} + \sum_{il} ges_{il,i,t} (1 - \tau_{i,il}^{\text{let}}) Z_{s_{il,i}} + \sum_{il} gesn_{i,il,t} (1 - \tau_{i,il}^{\text{let}}) + ie_{i,t} Z_i^{\text{imp}} \quad \forall i,t \quad (5)$$

6.5 Límites de la energía transmitida entre las regiones de control e importación por agentes externos

Debe tenerse en cuenta que entre las diferentes regiones de control existen líneas de transmisión de energía con diferentes capacidades de tensión, la potencia que se puede transmitir entre las regiones ($ges_{il,i,t}$) debe estar limitada por la capacidad que estas líneas de transmisión pueden soportar ($ges_{il,i,t}^{\text{cap}}$) ya que debe ser menor de lo que puede soportar, de la misma manera que para la energía importada de agentes externos de acuerdo.

Energía importada

$$ie_{i,t} \leq ie_{i,t}^{\text{cap}} \quad \forall i,t \quad (6)$$

Energía enviada

$$ges_{i1,t} \leq ges_{i1,t}^{\text{cap}} \quad \forall i,i1,t \quad (7)$$

La energía enviada a través de las nuevas líneas de transmisión instaladas debe estar limitada por la capacidad máxima de las líneas de transmisión, esta capacidad de transmisión de energía está limitada a través de la siguiente ecuación.

$$gesn_{i,i1} \leq gesn_{i,i1}^{\text{cap}} y_{i,i1}^{nl} \quad \forall i,i1 \quad (8)$$

$y_{i,i1}^{nl}$ es una variable binaria que identifica si se utilizará o no una nueva línea de transmisión de energía para su transferencia entre las regiones de control.

Pérdidas de energía de transmisión

$$loste_{i,t}^{\text{trans}} = \sum_{i1} ges_{i,i1,t} \tau_{i,i1}^{\text{let}} \quad \forall i,t \quad (9)$$

Cabe señalar que las pérdidas de transmisión de cada región dependen de $\tau_{i,i1}^{\text{let}}$, que es un coeficiente de pérdida de transmisión que representa una parte de la energía generada en la región $i1$, de la instalación generadora j , enviada a la región en un período de tiempo t .

6.6 Generación de energía a partir de instalaciones generadoras

La producción de electricidad proviene de la combustión de combustibles usados o de un recurso primario determinado ($f_{i,j,t}^f$) considerando la eficiencia del dispositivo con el uso de este $\alpha_{i,j,t}^f$ en un período de tiempo t .

$$GEj_{i,j,t}^p = f_{i,j,t}^f \alpha_{i,j,t}^f \quad \forall i,j,t \quad (10)$$

6.7 Límites para la energía generada por las instalaciones de generación

$GE_{i,j,t}^P$ deberán estar entre la capacidad mínima ($Ge_{i,j,t}^{\min}$) y la máxima ($Ge_{i,j,t}^{\max}$) instalada para las instalaciones existentes o nuevas en la región i durante el período de tiempo t . $y_{i,j}$ es una variable binaria que indica que la instalación j debe usarse o no en el futuro.

$$Ge_{i,j,t}^{\min} (y_{i,j}) \leq GE_{i,j,t}^P \quad \forall i, j, t \quad (11)$$

$$GE_{i,j,t}^P \leq Ge_{i,j,t}^{\max} (y_{i,j}) \quad \forall i, j, t \quad (12)$$

6.8 Capacidad de las instalaciones

Para las instalaciones existentes, la capacidad $POW_{i,j1}^e$ es un parámetro conocido; sin embargo, para las nuevas instalaciones, el tamaño correspondiente debe determinarse de la siguiente manera:

$$POW_{i,j2}^n \geq GE_{i,j2,t}^P \quad \forall i, j2, t \quad (13)$$

6.9 Costo operativo de las instalaciones de generación existentes

Los costos de operación y mantenimiento surgen de los costos fijos unitarios de operación y mantenimiento ($UFC_{i,j1}^e$), estos dependen de la región de control i y del tipo de tecnología de cada instalación de energía existente $j1$, multiplicados por la potencia o capacidad de las instalaciones de energía existentes ($POW_{i,j1}^e$), más los costos variables de operación y mantenimiento ($UVC_{i,j1}^e$) para la generación de energía en cada instalación de energía existente ($GE_{i,j1,t}^P$), lo que determina estos costos.

$$OptCost_{i,j1}^e = UFC_{i,j1}^e POW_{i,j1}^e y_{i,j1} + \sum_t UVC_{i,j1}^e GE_{i,j1,t}^P \quad \forall i, j1 \quad (14)$$

6.10 Costo operativo de las instalaciones de nueva generación

Los costes de operación y mantenimiento de las nuevas instalaciones de generación de energía $j2$ se generan a partir de los costos fijos unitarios (UFC_{ij2}^n) y de los costes variables unitarios (UVC_{ij2}^n). Los costos unitarios se multiplican por la capacidad de las nuevas unidades (POW_{ij2}^n) y la generación de energía de las nuevas unidades ($GE_{ij2,t}^P$), cabe señalar que los costos también dependen de la región de control i y la tecnología de las instalaciones. La suma de estos costos dará como resultado los costos totales de operación y mantenimiento en nuevas centrales eléctricas por región de control ($OptCost_{ij2}^n$).

$$OptCost_{ij2}^n = UFC_{ij2}^n POW_{ij2}^n + \sum_t UVC_{ij2}^n GE_{ij2,t}^P \quad \forall i, j2 \quad (15)$$

6.11 Costo de capital para instalaciones de nueva generación

El costo de capital para nuevas instalaciones está determinado por la siguiente ecuación, donde $CINVF_{ij2}^n$ representa el costo de inversión para cada nueva instalación de energía que dependía de la región de control i y la nueva instalación $j2$, y $GE_{ij2,t}^P$ es la energía que se generó en las nuevas instalaciones de energía.

$$CapCost_{ij2}^n = CINVF_{ij2}^n y_{ij2} + CINV_{ij2}^n POW_{ij2}^n \quad \forall i, j2 \quad (16)$$

El costo de capital para las instalaciones existentes es cero.

$$CapCost_{ij1}^e = 0 \quad \forall i, j1 \quad (17)$$

6.12 Costos de importación y transmisión de energía

Los costos de transporte dependen de la línea de transmisión, de acuerdo con el voltaje, el costo por GWh transportado de una región a otra es reportado por Saadi et al.,⁵² y depende de la cantidad de energía transportada de la región i a la región $i1$.

$$TCost_{i,il} = TC \sum_t ges_{i,il,t} \quad \forall i, il \quad (18)$$

Existen costos establecidos para la importación de energía de agentes externos a las regiones de control y que están interconectados a estos, estos costos dependen de la región de importación (IC_i) y la cantidad de energía importada.

$$ICost_i = IC_i \sum_t ie_{i,t} \quad \forall i \quad (19)$$

6.13 Costos de instalación de nuevas líneas de transmisión

El modelo propone la instalación de nuevas líneas de transmisión para la distribución de energía, los costos que se generarán a partir de estas nuevas instalaciones están representados por la Ecuación (20), donde $M_{i,il}^{nl}$ es un factor que considera el costo por km y la longitud de las líneas de transmisión implementadas, donde la variable binaria indica si la línea existe o no.

$$Cnl_{i,il} = M_{i,il}^{nl} L_{i,il}^{nl} y_{i,il}^{nl} \quad \forall i, il \quad (20)$$

6.14 Costo anual total

Los costos totales para cada instalación de generación j en cada región i están determinados por los costos operativos ($OptCost_{i,j}$), más los costos de capital anuales para cada instalación ($CapCost_{i,j}$). Donde k_F es el factor de ocupación fijo que anualiza la inversión y depende de la tasa de interés, así como de la vida útil de la planta. Esto puede ser diferente para cada instalación j . El costo anual total (TAC) se define como la suma de los costos anuales totales de cada instalación. Aunado a esto, se consideran costos de importación y costos de transmisión de energía ya que representan aportes importantes, de igual manera, se agregó el costo por la implementación de nuevas líneas de transmisión para la mejora continua del sistema energético.

$$\begin{aligned}
TAC = & \sum_i \sum_{j1} OptCost_{i,j1}^e + \sum_i \sum_{j2} OptCost_{i,j2}^n + k_F \sum_i \sum_{j2} CapCost_{i,j2}^n \\
& + \sum_i \sum_{i1} TCost_{i,i1} + \sum_i ICost_i + \sum_i \sum_{i1} Cnl_{i,i1}
\end{aligned} \tag{21}$$

6.15 Emisiones

Cabe destacar que $\beta_{i,j}^{em}$ es un factor que indica las emisiones por unidad de combustible provenientes de la combustión de recursos y $f_{i,j,t}^f$ es el recurso utilizado en cada región y por las instalaciones, el producto de estos representa las emisiones de cada instalación ($Emplant_{i,j}$).

$$Emplant_{i,j} = \sum_t f_{i,j,t}^f \beta_{i,j}^{em} \quad \forall i, j \tag{22}$$

- Emisiones anuales totales

$$TEm = \sum_i \sum_j Emplant_{i,j} \tag{23}$$

6.16 Agua usada

Para determinar el agua utilizada en cada región y para cada instalación ($WaterPlant_{i,j}$), se incluyó un factor por GWh producido de agua utilizada ($\gamma_{i,j}^{water}$) para cada instalación junto con la energía generada por plantas nuevas o existentes ($GE_{i,j,t}^P$).

$$WaterPlant_{i,j} = \sum_t GE_{i,j,t}^P \gamma_{i,j}^{water} \quad \forall i, j \tag{24}$$

- Consumo total anual de agua

$$TWater = \sum_i \sum_j WaterPlant_{i,j} \tag{25}$$

6.17 Uso de suelo

De la misma manera para esta relación, se incluye un factor de recuperación ($\delta_{i,j}^{\text{land}}$) para la tierra utilizada por plantas nuevas o existentes ($GE_{i,j,t}^P$), donde $LandPlant_{i,j}$ es la tierra utilizada por cada instalación.

$$LandPlant_{i,j} = \sum_t GE_{i,j,t}^P \delta_{i,j}^{\text{land}} \quad \forall i, j \quad (26)$$

El total de la tierra utilizada se determina de la siguiente manera:

$$TLa = \sum_i \sum_j LandPlant_{i,j} \quad (27)$$

6.18 Enfoque de múltiples partes interesadas

El enfoque multistakeholder se refiere a la incorporación de todos los participantes interesados que conforman el sistema, optimizando cada uno de los objetivos, que en este caso son el Costo Total Anual (TAC), las Emisiones Totales de Energía por las unidades de generación (TEM), el Consumo Total de Agua de las unidades de generación (TWATER). Con la optimización de estas partes interesadas, es posible crear el punto utópico con los valores más bajos obtenidos de cada objetivo. El Punto Utópico es una solución inviable ya que representa la solución ideal y los objetivos se oponen a alcanzar la solución factible, por el contrario, el punto Nadir representa la peor solución y se obtiene con los valores máximos obtenidos de cada objetivo. El enfoque multiobjetivo propuesto para resolver el modelo de Programación Lineal Mixta-Entera (MILP) consiste en crear una nueva función objetivo que implica minimizar los valores de los objetivos antes mencionados.

$$\min \quad mof \left[\Phi_{TAC} + \Phi_{TEM} + \Phi_{TWATER} \right] \quad (28)$$

Sin embargo, cada término de la función objetivo debe normalizarse utilizando valores del punto utópico y el punto nadir:

$$\Phi_{TAC} = \frac{TAC - \phi_{TAC}^{\min}}{\phi_{TAC}^{\max} - \phi_{TAC}^{\min}} \quad (29)$$

$$\Phi_{TEm} = \frac{TEm - \phi_{tem}^{\min}}{\phi_{tem}^{\max} - \phi_{tem}^{\min}} \quad (30)$$

$$\Phi_{TWater} = \frac{TWater - \phi_{tw}^{\min}}{\phi_{tw}^{\max} - \phi_{tw}^{\min}} \quad (31)$$

7 Resultados

El modelo de optimización está compuesto por 36,435 variables continuas, 73,128 restricciones y 384 variables binarias, el modelo matemático mencionado anteriormente fue codificado en GAMS (Ferris, 1999b). Es un problema de programación lineal de enteros mixtos que se resolvió con el solucionador CPLEX.

Los diferentes escenarios que se abordan en este apartado fueron optimizados para atender las demandas energéticas de 2020, 2025 y 2030. La demanda de energía esperada se obtuvo a través de las perspectivas realizadas en PRODESEN.⁵⁵ se abordaron los resultados obtenidos para la generación, transmisión y pérdidas de energía, así como las emisiones generadas en cada escenario y el número de instalaciones utilizadas.

- Scenario A. Minimización TAC (Año 2020).
- Scenario B. Minimización TEM (Año 2020).
- Scenario C. Minimización TWATER (Año 2020).
- Scenario D. Minimización TAC (Año 2025).
- Scenario E. Minimización TEM (Año 2025).
- Scenario F. Minimización TWATER (Año 2025).
- Scenario G. Minimización TAC (Año 2030).
- Scenario H. Minimización TEM (Año 2030).
- Scenario I. Minimización TWATER (Año 2030).
- Scenario J. Minimización MSH (Año 2020).
- Scenario K. Minimización MSH (Año 2025).
- Scenario L. Minimización MSH (Año 2030).

Los escenarios A al I, representan soluciones factibles para lograr los objetivos del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), donde se minimizan tres objetivos individualmente como el Costo Total Anual (TAC), las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) y el consumo de agua (TWATER). Mientras que los escenarios J, K, L representan soluciones factibles con un enfoque multiobjetivo para satisfacer los requisitos del SEN.

Los escenarios A, B y C tuvieron una producción de energía de 338,498 GWh, 314,501 GWh y 316,059 GWh respectivamente, la distribución mensual de dicha generación por región de control se puede observar en la **Figura 14** y en la **Figura 15** se muestra la participación de cada una de las tecnologías consideradas en el modelo en las regiones de control.

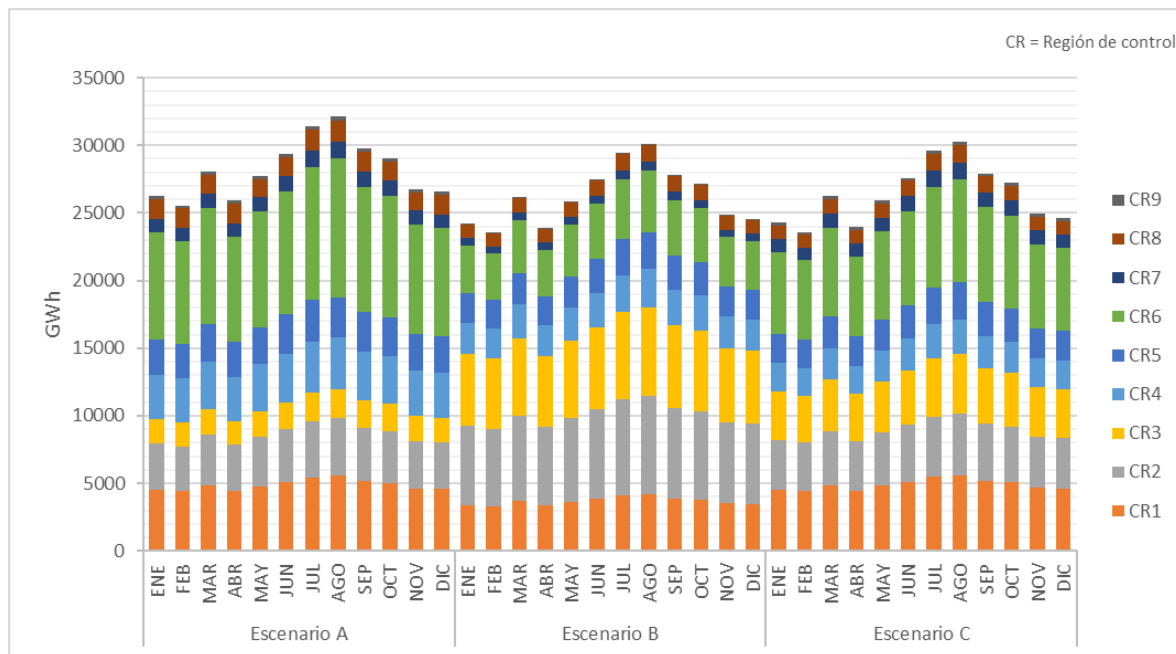


Figura 14. Generación eléctrica mensual por región de control para el año 2020 con los objetivos de los escenarios A, B y C.

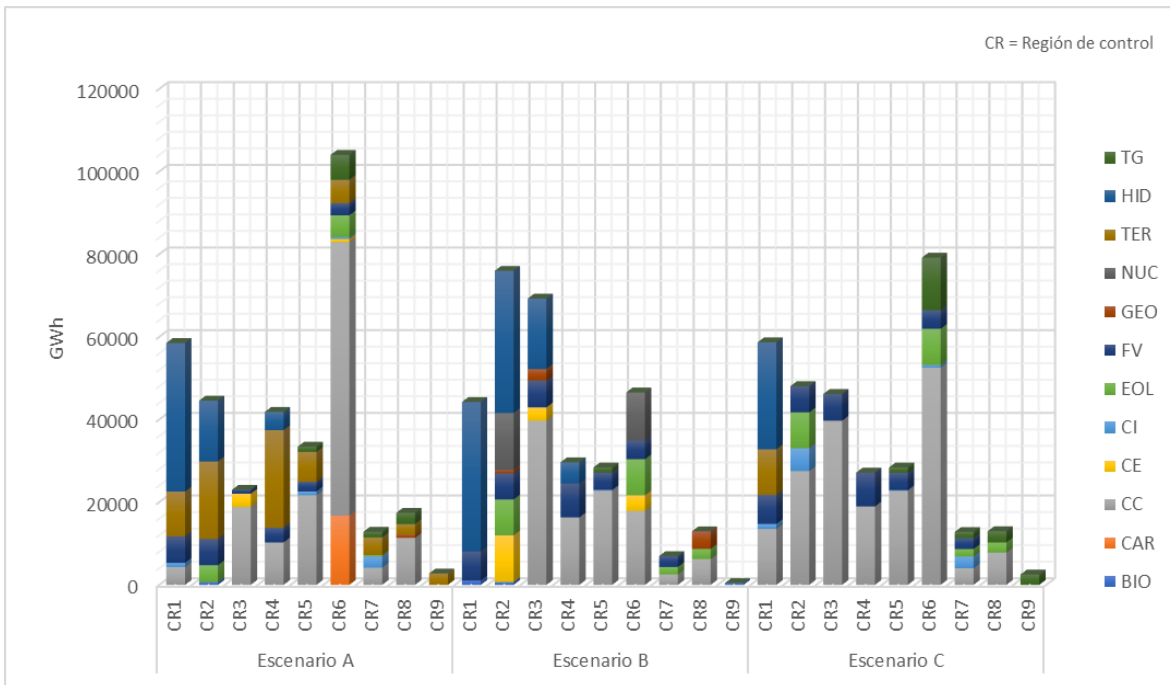


Figura 15. Participación y contribución de tecnologías en la generación de energía eléctrica en las regiones de control para los escenarios A, B y C.

El número de instalaciones de generación de energía consideradas para el escenario A fue de 112, de las cuales todas son instalaciones ya existentes en la SEN. No se requieren nuevas plantas, mientras que para el escenario B hubo 114 de las cuales 97 ya son instalaciones existentes en la SEN y 17 son nuevas instalaciones consideradas. Para el escenario C fueron 112, donde 98 ya son instalaciones existentes y 14 son nuevas plantas consideradas, esto debido al objetivo marcado por cada escenario.

La reducción en el número de instalaciones generadoras de energía es consecuencia de la vida útil de las instalaciones, la retirada por el bajo factor planta, estos costes de operación y mantenimiento generados, la instalación estratégica de instalaciones generadoras a partir de energías renovables.

En estos escenarios podemos ver cómo la minimización de los objetivos afecta a la transmisión de energía, la **Figura 16** muestra que los escenarios A, B y C tienen interacción energética entre regiones. Sin embargo, el escenario A favorece más la transmisión de energía entre regiones de control que el escenario B y C. Los beneficios en la transmisión de energía para el escenario A se deben a la región donde se instalan

las nuevas plantas, ya que hay regiones de control que no pueden satisfacer su demanda de energía por sí mismas. En consecuencia, estas nuevas instalaciones de generación de energía se instalan en estas regiones para aumentar su seguridad energética.

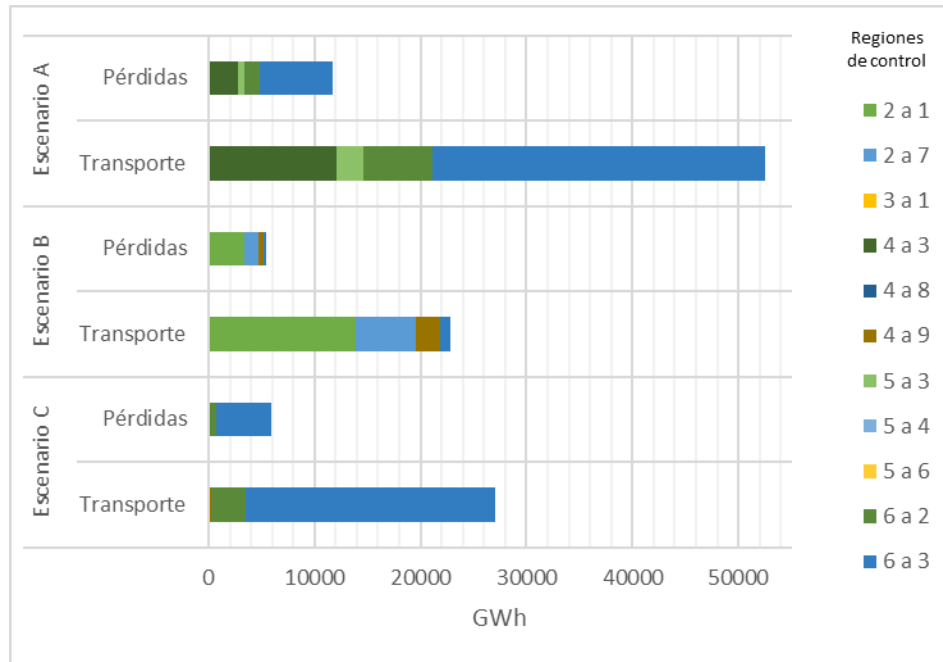


Figura 16. Transmisión de energía eléctrica entre regiones de control y pérdidas de energía por transmisión del Sistema Eléctrico Nacional para los escenarios A, B y C.

Los escenarios D, E y F siguieron la misma tendencia que los escenarios A, B y C. Sin embargo, para satisfacer la demanda de energía excedente, es necesario aumentar la generación de energía. En el escenario D se produjeron 389,456.87 GWh, para el escenario E la generación obtenida fue de 368,249.28 GWh y para el escenario F la generación fue de 370,737.22 GWh. Las distribuciones mensuales y las cuotas de tecnología se muestran en las **Figuras 17 y 18**.

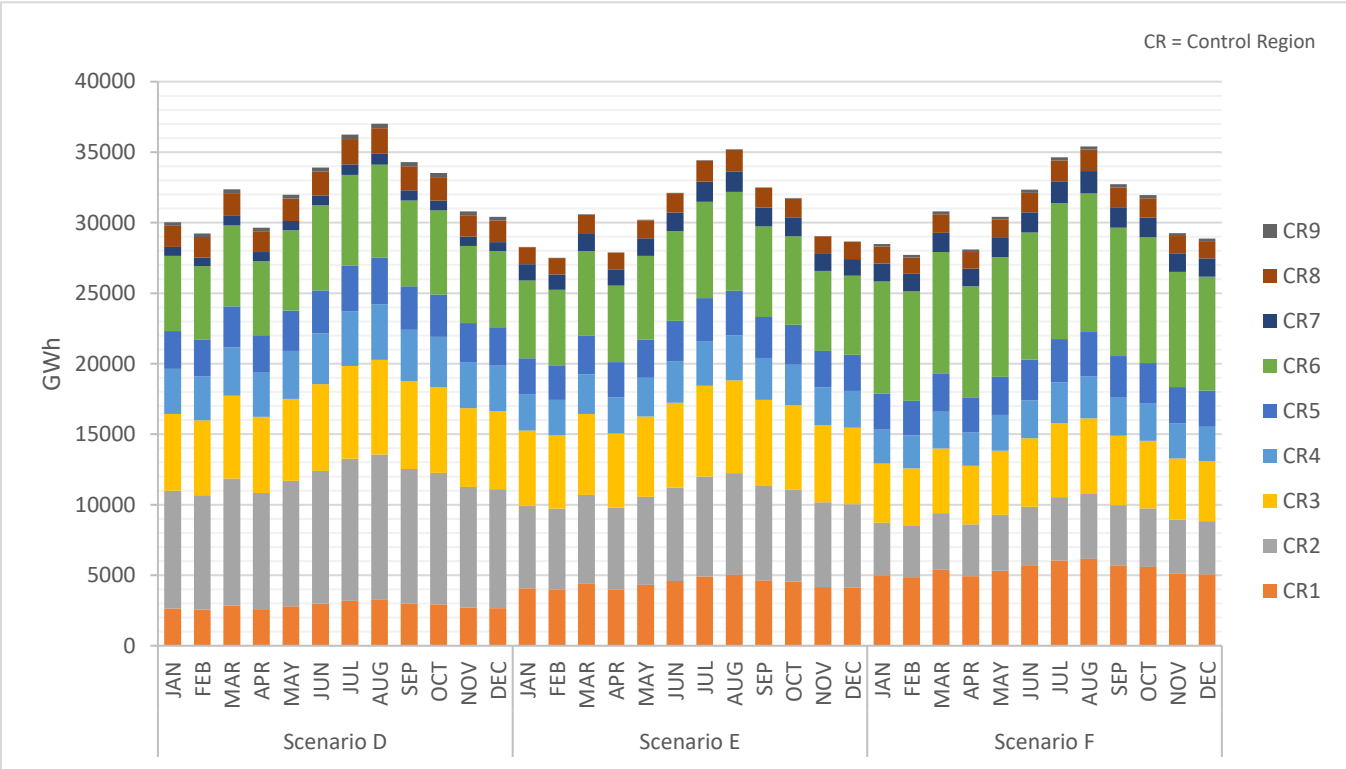


Figura 17. Generación mensual de energía eléctrica en las regiones de control del Sistema Eléctrico para los escenarios D, E y F (2025).

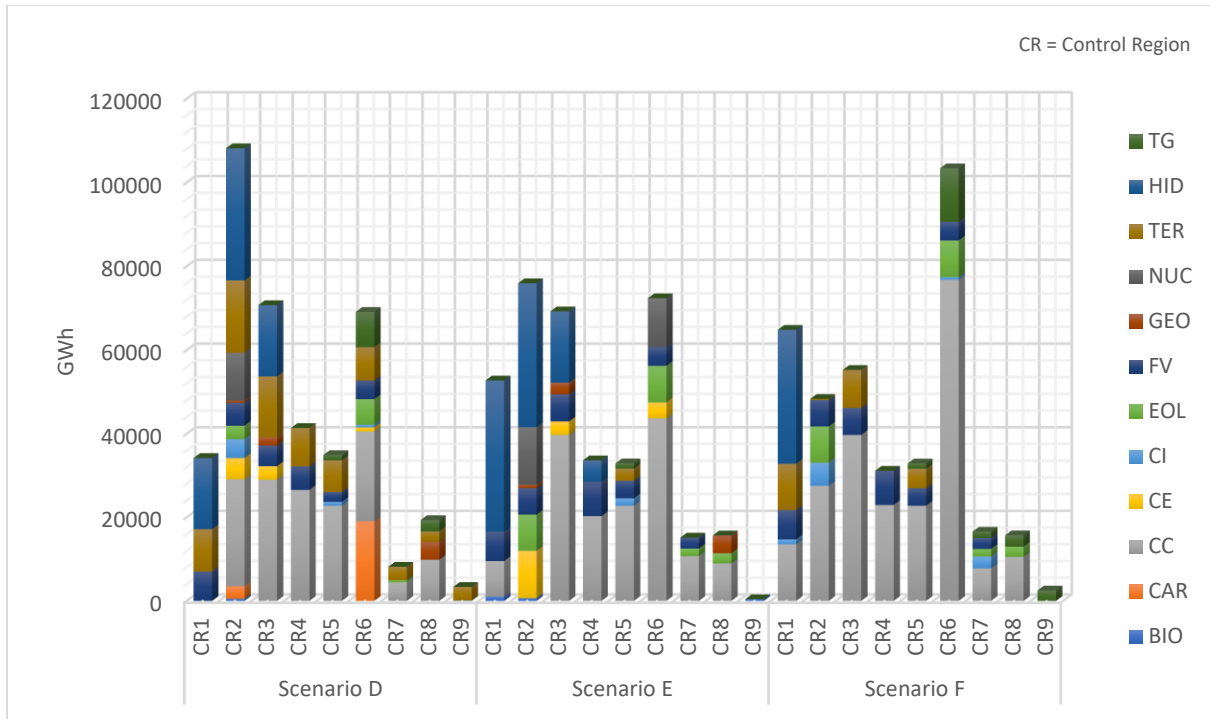


Figura 18. Generación de energía eléctrica en cada región de control e importancia de las tecnologías en el Sistema Eléctrico para los escenarios D, E y F.

Para el escenario D, se consideraron 129 plantas, todas ya existentes en el SEN. Para el escenario E, se consideraron 130 plantas generadoras de energía, de las cuales 111 ya son plantas existentes en la SEN y 19 son instalaciones nuevas. En el escenario F, se consideraron 123 plantas, donde 110 son plantas existentes y se propuso instalar 13 nuevas plantas.

De la misma manera que para los escenarios A, B y C, en los escenarios D, E y F la minimización del Costo Anual Total favorece la transmisión de energía, esto en consecuencia busca minimizar los costos, evitando la inversión en la instalación de nuevas plantas generadoras de energía. La **Figura 19** muestra la tendencia de la transmisión de energía entre regiones.

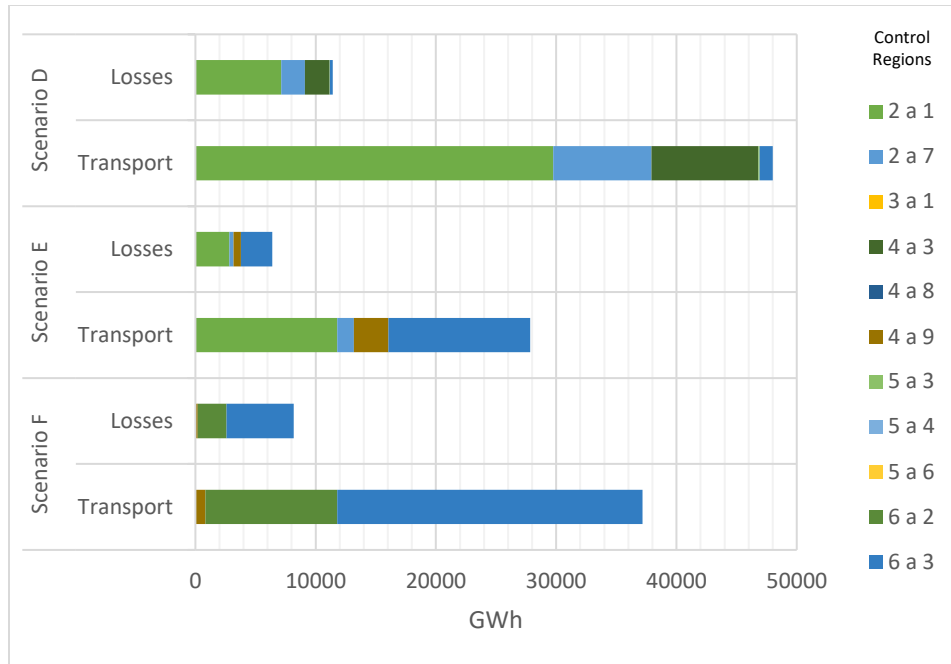


Figura 19. Transmisión de energía eléctrica entre regiones de control y pérdidas de energía por transmisión del Sistema Eléctrico Nacional para los escenarios D, E y F

La generación de energía para los escenarios G, H e I fue de 444,656.66 GWh, 426,890 GWh y 422,601.81 GWh respectivamente. La demanda de energía para 2030 aumenta significativamente, por lo tanto, la cantidad de energía generada aumenta para satisfacer esta demanda. La participación de las regiones de control en la generación se puede observar en la **Figura 20**, y la participación de las tecnologías consideradas se observa en la **Figura 21**.

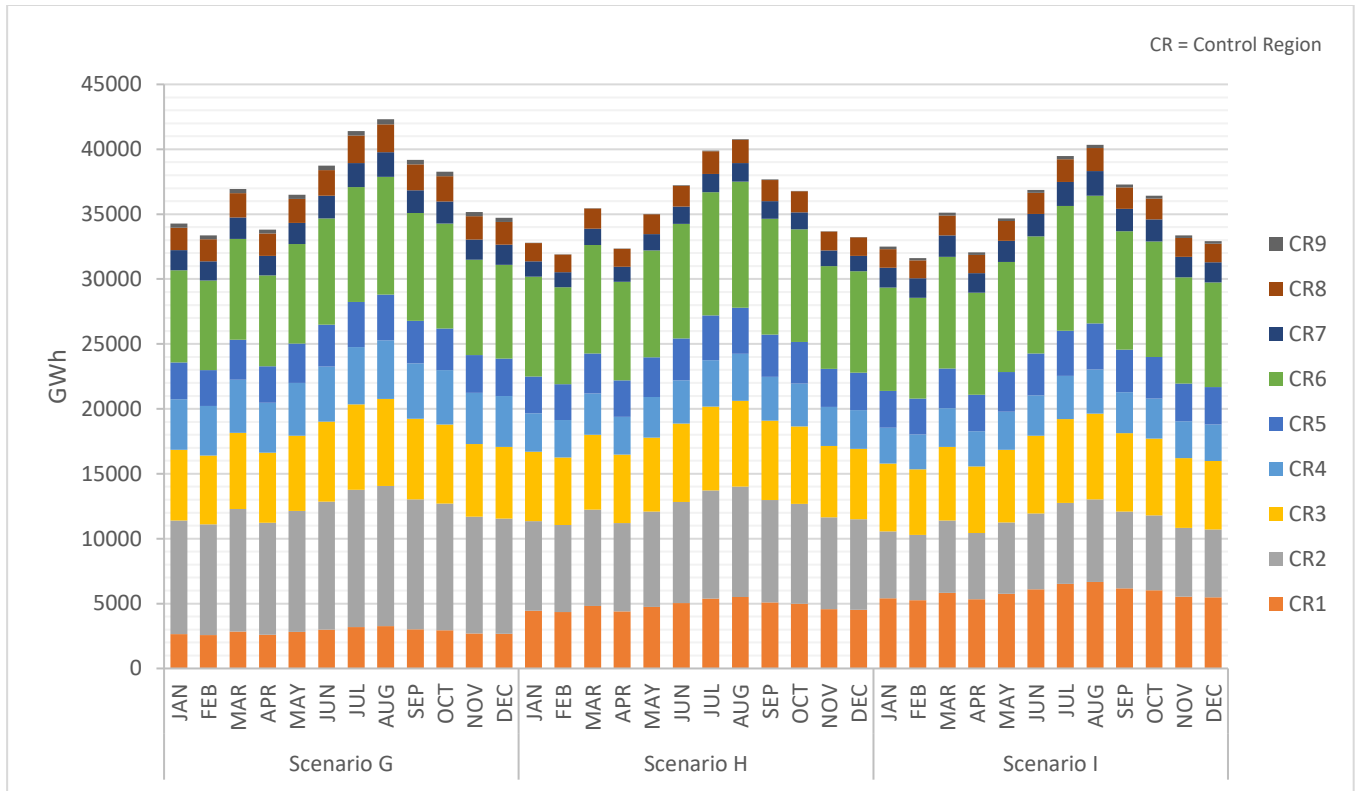


Figura 20. Distribución mensual de la generación eléctrica en las regiones de control del sistema eléctrico para el año 2030.

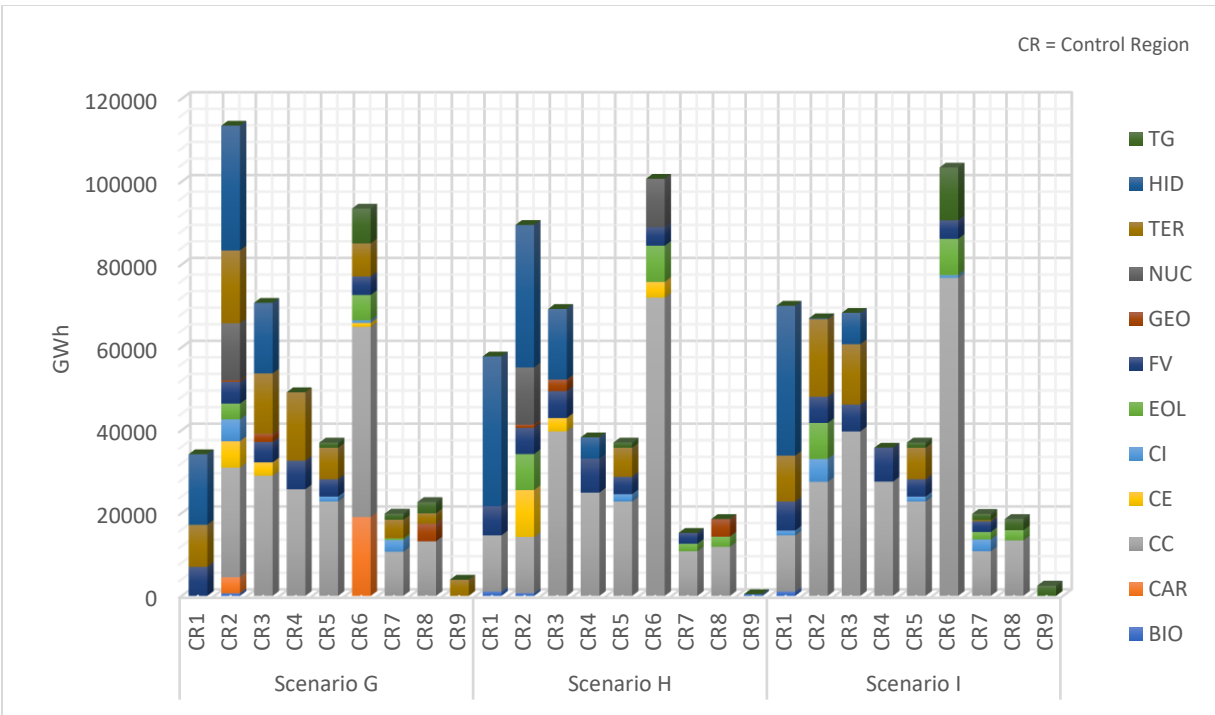


Figura 21. *Generación de electricidad para el año 2030 y participación de las tecnologías consideradas en cada región de control para los escenarios G, H e I.*

El escenario G mostró la participación de 145 centrales eléctricas de las cuales 143 ya existen en la SEN y se considera la instalación de 2 nuevas centrales eléctricas. Para el escenario H, se consideraron 139 centrales eléctricas de estas 139 plantas, 119 ya eran plantas existentes y 20 son plantas nuevas. Mientras que para el escenario I, las plantas que pudieron cumplir con los objetivos fueron 137 plantas, donde 122 son plantas existentes y 15 son instalaciones nuevas.

La tendencia en la transmisión de energía entre regiones fue la misma que en los escenarios anteriores ya descritos, esta tendencia se puede observar en la **Figura 22**, en consecuencia, a los objetivos planteados.

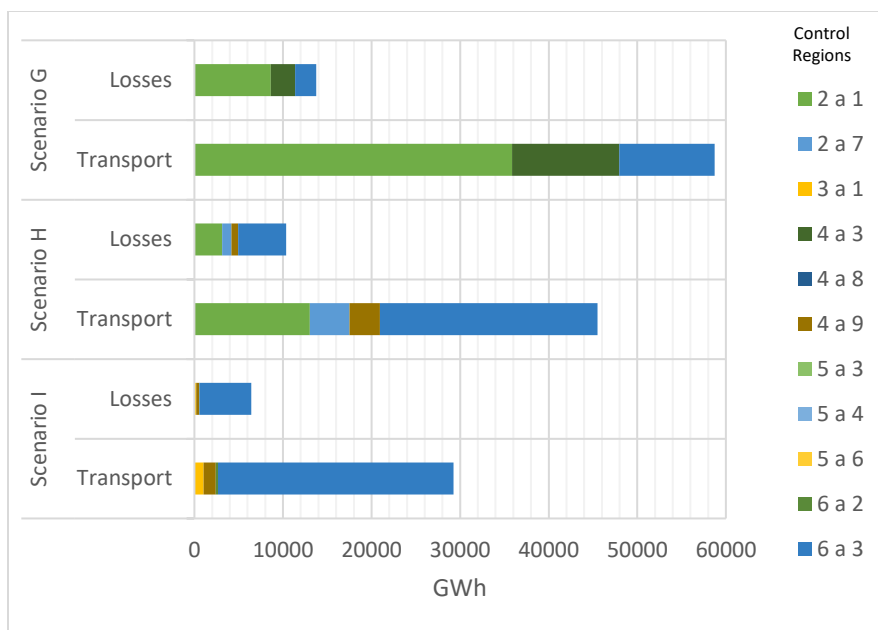


Figura 22. Transmisión de energía eléctrica entre regiones de control y pérdidas de energía por transmisión del Sistema Eléctrico Nacional para los escenarios G, H e I.

7.1 Minimización de la función multiobjetivo (MSH)

Los escenarios J, K y L se obtuvieron utilizando un enfoque multiobjetivo. En estos escenarios, se encontraron soluciones factibles para satisfacer la demanda de energía eléctrica teniendo tres objetivos que se oponen y el objetivo es obtener resultados equilibrados.

En 2019, SENER⁵³ reportó una generación de energía de 320,056.14 GWh, donde el 78.24% se produjo a partir de energías convencionales y el 21.76% a partir de energías limpias. En comparación, el escenario J generó 314,526.2 GWh donde la participación de la energía convencional fue del 47.16% y el 52.84% restante fue de energía limpia.

La generación de energía en el escenario K fue de 371,364.13 GWh donde las energías convencionales aportaron el 55.25% y las energías limpias generaron el 44.75% de dicha energía. Para el escenario L se generaron 427,466.66 GWh, donde las energías convencionales aportaron el 61.12% y las energías limpias el 38.88%. La contribución de las energías limpias a lo largo del tiempo se ve reducida por el desfase de la capacidad

instalada y el aumento de la generación de energía para satisfacer la demanda de energía.

En los tres escenarios, se cumplen los objetivos ambientales; sin embargo, es importante proponer una transición energética para los próximos años.

La tecnología con mayor participación en el escenario J es el ciclo combinado (CC) que representó el 40.49% de la energía generada en ese escenario y la menos importante fue la combustión interna (CI) que aporta el 0.43% de la energía total. Además, hubo cero participaciones de 4 tecnologías que fueron bioenergía, carbón, geotermia y termoeléctrica.

Los escenarios K y L tuvieron un comportamiento similar, siendo el Ciclo Combinado (CC) la tecnología con mayor participación en la generación de energía con 48.39% y 48.03%, respectivamente. La tecnología con menor participación fue Combustión Interna (IC) con 0.56% y 1.56%. Sin embargo, en estos escenarios, respectivamente, solo existen 3 tecnologías con participación cero, que fueron bioenergía, carbón-eléctrico y geotérmico (ver **Figura 23**).

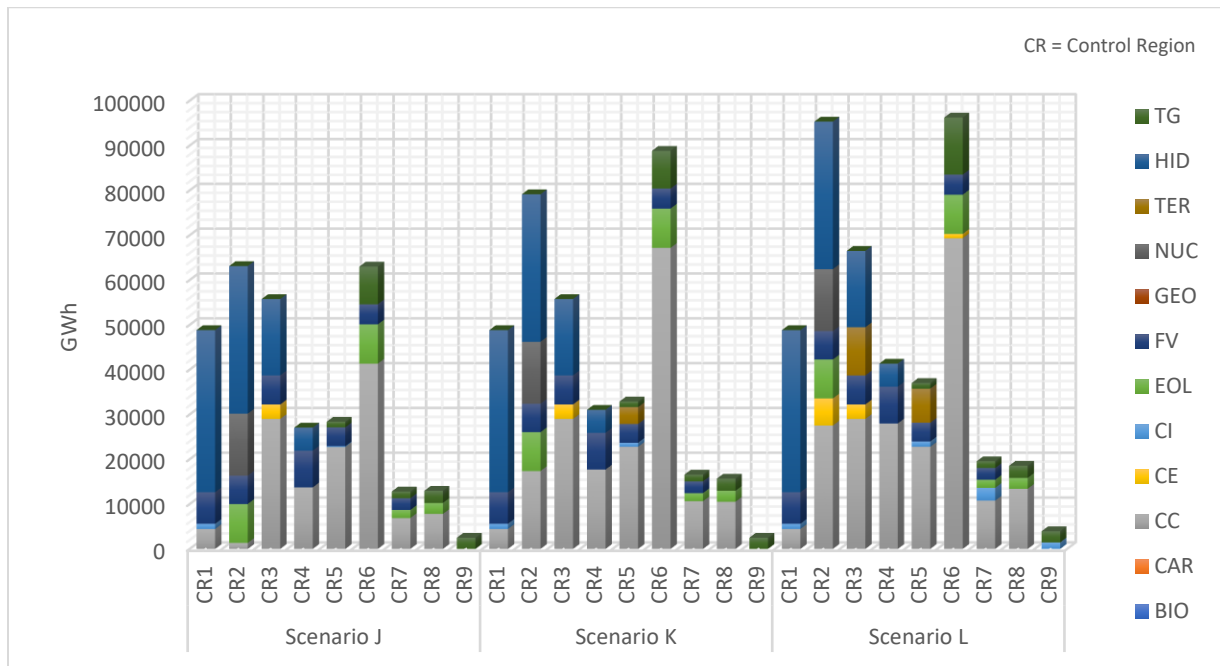


Figura 23. Generación de energía eléctrica por tecnología en cada región de control del sistema eléctrico para los escenarios J, K y L (enfoque multiobjetivo).

La **Figura 24** muestra el comportamiento de la generación de energía en el tiempo estimado, teniendo en cuenta la participación de las regiones de control. Para el escenario J, la región de control 2 (Oriental) es la más importante en la generación de energía con el 20.07% de la energía total. Mientras que para los escenarios K y L, la región más importante en generación de energía fue la región de control 6 (Noreste) con 23.92% y 22.52%, respectivamente.

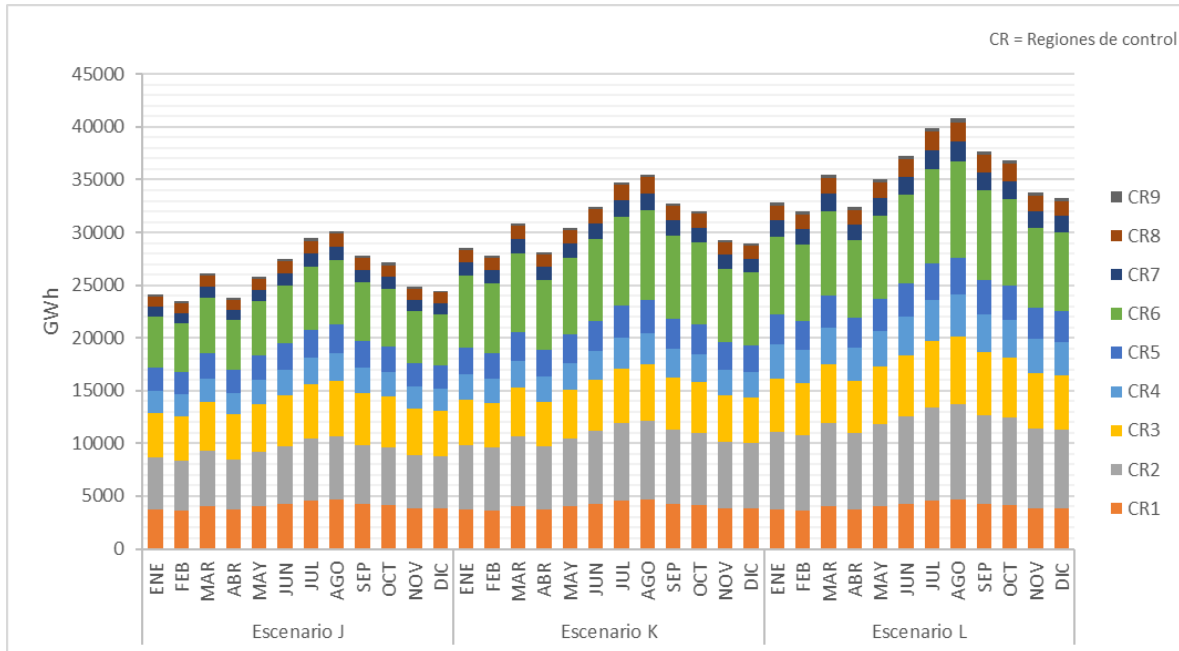


Figura 24. Distribución mensual de la generación de energía en las regiones de control, minimizando la función multiobjetivo.

Las plantas utilizadas en el escenario J fueron 121 plantas, de las cuales 112 plantas ya existen en la SEN y 9 plantas son nuevas instalaciones generadoras de energía. Para el escenario K, las plantas utilizadas fueron 132, donde ya existen 123 plantas y 9 son instalaciones nuevas. Mientras que para el escenario L, se tomaron en cuenta 145 plantas de generación de energía, donde 134 ya son plantas existentes y 11 son instalaciones nuevas.

La transmisión de energía entre las regiones de control en los escenarios J, K y L fue de aproximadamente 23,751.1 GWh, 41,199.4 GWh y 48,945.37 GWh respectivamente. Las pérdidas de transmisión tuvieron variaciones debido a las regiones que se activan y desactivan en la transferencia y la cantidad de energía enviada. Para el escenario J, la

pérdida de transferencia fue de aproximadamente 22.8%, para el escenario K fue de 22.76%, mientras que para el escenario L fue de 23.01% (ver **Figura 25**). Sin embargo, las pérdidas se pueden minimizar mejorando las rutas de transmisión de energía, el mantenimiento adecuado y el uso de materiales, o aumentando la capacidad de las líneas de transmisión e instalando nuevas líneas, como en el caso de este trabajo. La transición de la energía eléctrica y la implementación de sistemas de almacenamiento de energía también son objetivos importantes para un sistema de energía sostenible.

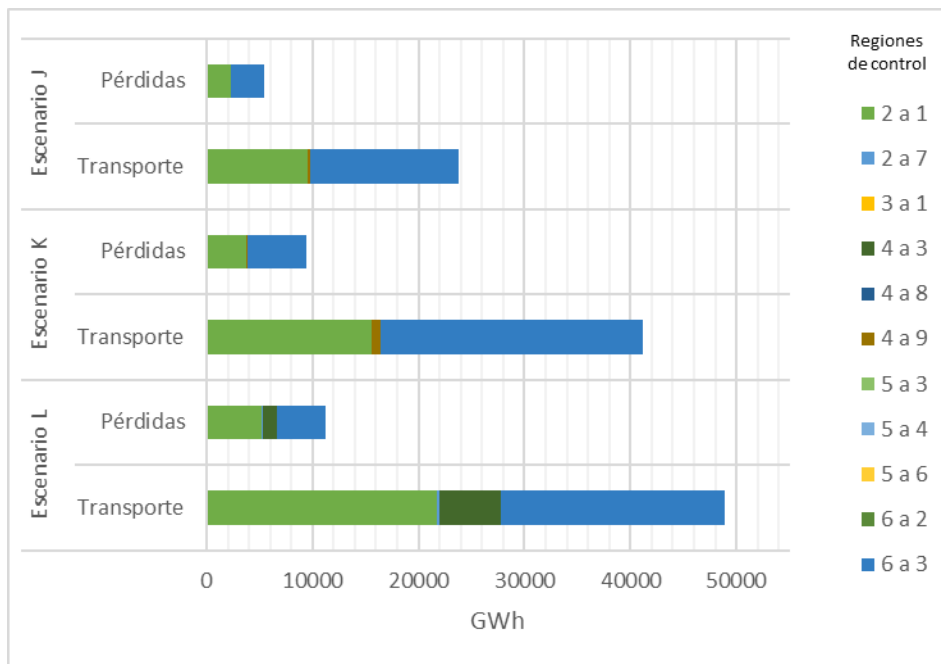


Figura 25. Interacción, transmisión y pérdidas debidas a la transmisión de energía eléctrica en las regiones de control del sistema energético para los escenarios J, K y L.

En el tema de la transmisión de energía, es importante destacar la pérdida de energía, ya que la SEN tiene una de las mayores pérdidas de transmisión y distribución del planeta. Es importante analizar el voltaje, la longitud y la fase de las interconexiones, así como el mantenimiento y la sustitución de materiales o componentes en el sistema. Cabe destacar que las líneas con mayores pérdidas son las de baja y media tensión.

Una planificación adecuada de la transmisión y distribución de energía, así como una comparación con la implementación de sistemas de almacenamiento de energía junto con la transición energética puede minimizar los costos anuales totales en un sistema

energético, así como las emisiones de gases de efecto invernadero y proporcionar una seguridad energética notable. Los resultados obtenidos en estos tres escenarios (J, K y L) muestran alternativas al sistema energético actual para cumplir con los compromisos ambientales y reducir los costes generados por el mismo.

Las emisiones de gases de efecto invernadero se muestran en la **Figura 26**. El balance en el enfoque multiobjetivo muestra escenarios en los que es factible reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la SEN hoy en día hasta en un 50%. Para 2019, según SENER⁵³, la cantidad de emisiones fue de 130 millones de toneladas de CO_{2eq}, mientras que para los escenarios J, K y L, las estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero fueron de 67.55, 89.82 y 116.43 millones de toneladas de CO_{2eq}, respectivamente.

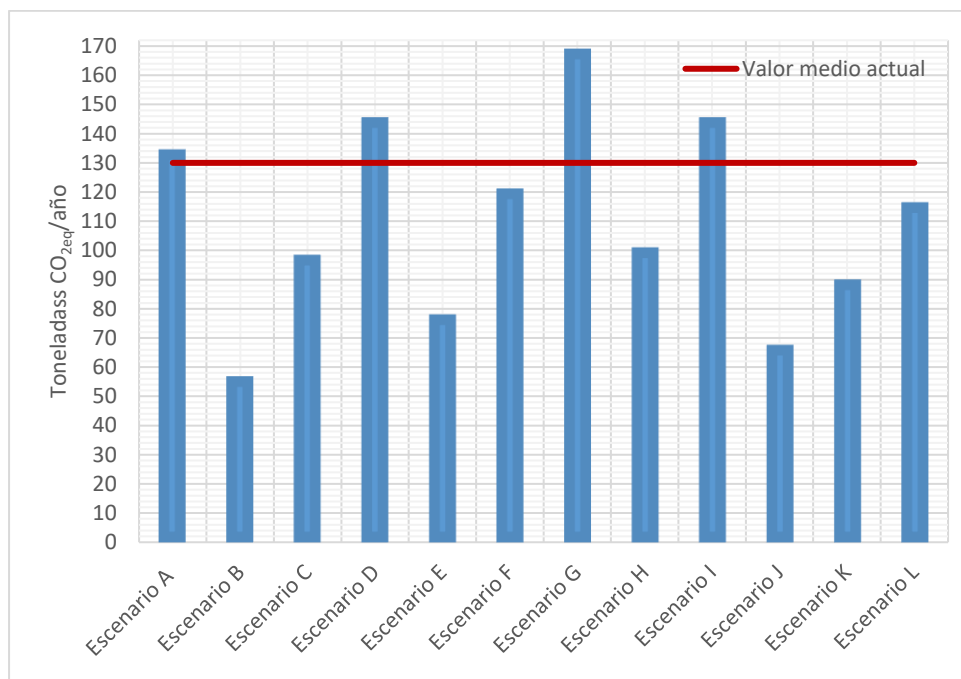


Figura 26. Toneladas anuales de CO_{2eq} emitidas en cada uno de los escenarios propuestos, incluyendo el promedio anual actual.

Es necesario destacar que el modelo matemático tiene la posibilidad de considerar hasta 187 plantas generadoras de energía de las cuales 164 son instalaciones que ya están en la SEN y 23 plantas surgen como propuesta de instalación en diferentes regiones de control.

Los resultados obtenidos denotan la capacidad de generación de energía con menos instalaciones generadoras que las que existen actualmente en la SEN. En consecuencia, la disminución de las plantas generadoras de energía se debe a su vida útil, así como a la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos o la cantidad de agua necesaria para la generación de energía.

Los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios propuestos se pueden ver gráficamente en las **Figuras 27, 28 y 29**. Se agregaron los puntos nadir y utópicos para visualizar el peor escenario y el mejor escenario, cada gráfico representa cada año analizado 2020, 2025 y 2030. La **Tabla 2** muestra los montos de los resultados obtenidos en los escenarios propuestos en millones de toneladas, millones de USD y hm³ por año.

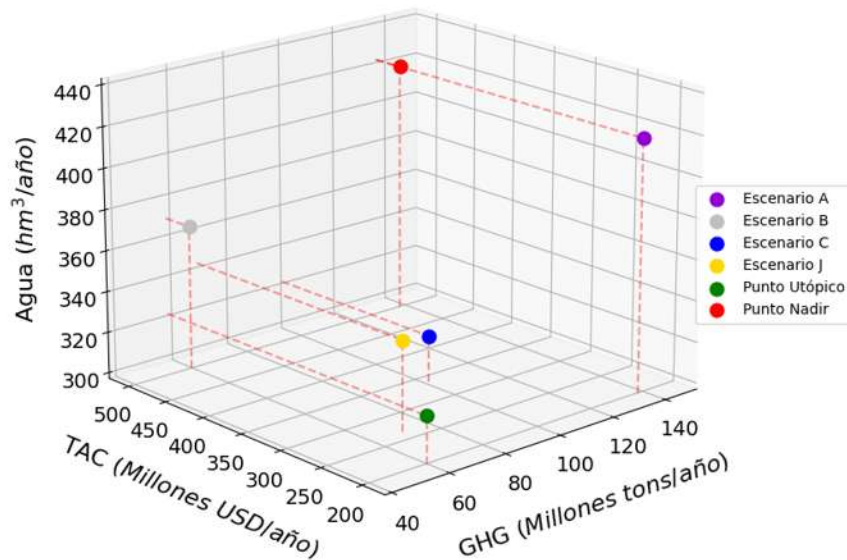


Figura 27. Valores de función objetivo con punto nadir y utópico, para el sistema energético en los escenarios A, B, C y J.

Fig. 1

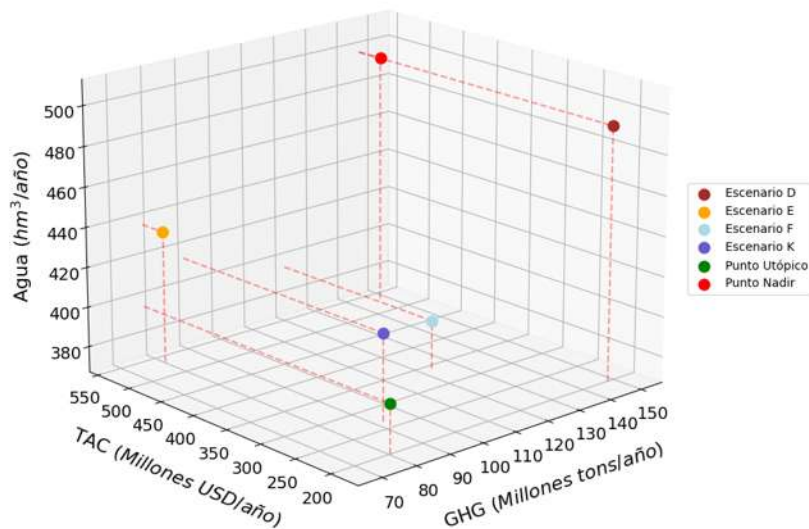


Figura 28. Valores de función objetivo con punto nadir y utópico, para el sistema energético en los escenarios D, E, F y K.

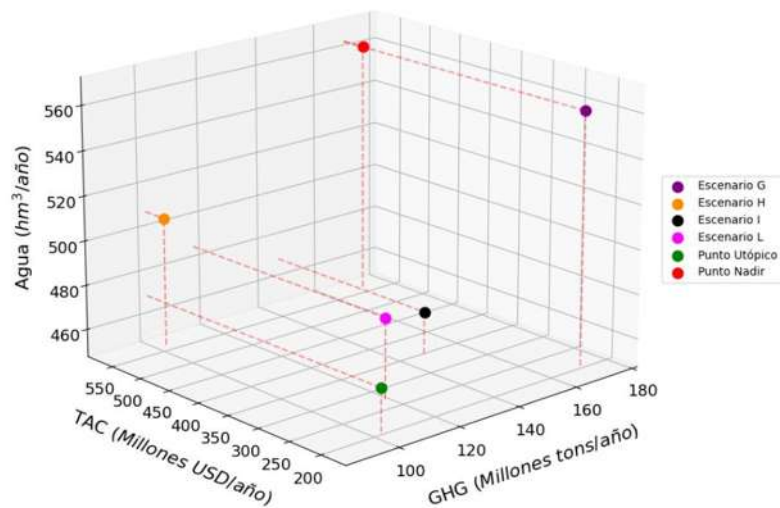


Figura 29. Valores de función objetivo con punto nadir y punto utópico, para el sistema energético en los escenarios G, H, I y L.

Tabla 2. Comparación de los escenarios en el costo anual total, las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de agua por año.

	TEM (Millones de toneladas/año)	TAC (Millones de USD/año)	TWATER (hm ³ /año)
Escenario A	134.48	188.877	422.767
Escenario B	56.792	488.099	369.959
Escenario C	98.383	327.588	322.646
Escenario D	145.406	188.876	496.174
Escenario E	77.975	522.044	435.787
Escenario F	121.11	330.797	394.218
Escenario G	168.886	193.662	562.8
Escenario H	100.94	551.974	507.389
Escenario I	145.459	336.389	469.127
Escenario J	67.552	1254.869	343.709
Escenario K	89.919	1256.54	413.256
Escenario L	116.431	1261.499	485.838

La instalación de nuevas líneas de transmisión para interconectar el sistema se originó para beneficiar la seguridad energética. La interconexión de algunas regiones de control como Baja California y Baja California Sur con nuevas líneas de transmisión ocurrió en 9 de los 12 escenarios presentados.

Los escenarios A, D y G no consideraron la instalación de nuevas líneas de transmisión para reducir costos ya que los costos de instalación son mayores que los costos de operación. Además, se aumentó la capacidad (50 MW) de las líneas de transmisión existentes en el sistema energético para mejorar la seguridad energética en las regiones de control.

8 Conclusiones

En este trabajo se han presentado enfoques de optimización individuales y multiobjetivo para la planificación estratégica de un sistema energético considerando aspectos importantes como el impacto del aumento de la capacidad de las líneas de transmisión existentes en el sistema energético. La instalación de nuevas líneas de transmisión de energía para la interconexión de algunas regiones de control se consideró en el modelo

propuesto. Se consideró el impacto de las pérdidas de energía debidas al transporte de energía entre regiones y la implantación o retirada de instalaciones generadoras de energía en beneficio de los diferentes objetivos considerados, como la reducción del consumo de agua, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción de costes. El modelo matemático propuesto puede ser utilizado como una herramienta para la toma de decisiones para escenarios futuros en un sistema energético.

Como estudio de caso, se consideró el sistema energético mexicano, donde hay siete regiones de control interconectadas y dos regiones aisladas adicionales a este sistema interconectado. En este sistema energético mexicano, hay un total de 21,290 MW de capacidad para las líneas de transmisión existentes. Se prevé ampliar esta capacidad hasta los 24,290 MW, con un incremento del 14%.

Es importante mencionar que la tecnología predominante en el sistema energético mexicano es el ciclo combinado. Sin embargo, se pretende que para 2024 las energías renovables tengan una mayor participación en la generación de energía. En consecuencia, la instalación de plantas de fuentes renovables y la retirada de instalaciones que superen su vida útil o generen un desequilibrio en el sistema deben ser primordiales.

El principal desafío de esta planificación fue implementar y aumentar la capacidad de las líneas de transmisión para interconectar estas dos regiones aisladas al sistema y aumentar su seguridad energética. Del mismo modo, cuantificar las pérdidas generadas por estas líneas, el coste de instalación y mantenimiento. También se debe considerar la eliminación y el mantenimiento de algunas instalaciones, ya que aumentan los costos y su contribución puede reemplazarse con una planificación óptima.

Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron diferentes escenarios, destacando que el sistema energético nacional depende de las importaciones de energía. En los escenarios propuestos, las dependencias de la electricidad importada se obtuvieron del 4% al 6% de la energía total. Sin embargo, estos resultados muestran que es factible retirar las unidades de generación de energía para minimizar las emisiones y los costos de gases de efecto invernadero, ya que hay plantas generadoras de energía obsoletas

que están sobre su vida útil. Además, la tecnología de algunos de ellos emite una gran cantidad de gases de efecto invernadero.

La implantación de nuevas unidades de generación de energía es necesaria ya que los sistemas energéticos deben considerar la transición energética hacia un sistema energético sostenible. Considerar una inversión para la instalación de unidades de generación de energía limpia, en los escenarios donde se proponga. El objetivo de minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar el consumo de agua en el sistema energético favorece la inversión en unidades de generación de energía. Teniendo en cuenta que para 2024 el país se ha fijado la meta de producir el 35% de la energía a partir de fuentes de energía renovables, cumpliendo, de igual manera, el objetivo del Acuerdo de París en respuesta a la amenaza del cambio climático.

Se debe tomar en cuenta la modernización del Sistema Eléctrico Nacional de México, debido al uso, desgaste y longevidad de ciertas unidades esenciales en el sistema energético. La red eléctrica ha sufrido problemas de suministro debido a fallas, en consecuencia, es necesario llevar a cabo la actualización, modernización y mantenimiento adecuado para garantizar la satisfacción de los participantes en el sistema y los consumidores de energía.

El transporte de energía entre las regiones del sistema energético debe ser parte fundamental de su planificación ya que con el escenario correspondiente es posible reducir costes, emisiones y el consumo de agua generada por el sistema. Las pérdidas de energía de este sistema fueron de alrededor del 23% para la cantidad de energía transportada, es necesario considerar el voltaje, la fase y la longitud de las líneas de transmisión para reducir estas pérdidas.

La interconexión de sistemas aislados y el aumento de capacidad en las líneas de transmisión existentes, llevado a cabo en este proyecto, favorecieron la seguridad energética de algunas regiones de control. Del mismo modo, la instalación de nuevas centrales eléctricas. Sin embargo, observamos que, debido a la región de instalación de las nuevas plantas de generación de energía, la transmisión disminuye a medida que aumenta su independencia energética.

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden ser alternativas para reservar la energía transmitida entre las regiones de control del sistema energético. Debe proponerse un análisis para desglosar las ventajas y desventajas de aplicar un enfoque en el que los sistemas de almacenamiento proporcionen una reserva para las regiones con menos seguridad energética.

Es importante considerar la implementación en el trabajo futuro de sistemas con un enfoque en el equilibrio social y económico para lograr la satisfacción de los miembros del sistema energético.

9 Nomenclatura

9.1 Conjuntos

- i Regiones de control.
- j Instalaciones de generación total.
- $j1(j)$ Instalaciones de generación existentes.
- $j2(j)$ Instalaciones de nueva generación.
- t Período de tiempo (meses).

9.2 Parámetros

- $\alpha_{i,j,t}^f$ Factor de conversión o eficiencia para las fuentes de energía utilizadas por las instalaciones generadoras de energía según su tipo de tecnología, GWh/hm³, GWh/hm², GWh/ton.
- $\beta_{i,j}^{em}$ Factor de emisiones de la combustión de recursos, ton/GWh.
- $\gamma_{i,j}^{water}$ Factor de consumo de agua para tecnologías generadoras de electricidad, hm³/GWh.
- $\delta_{i,j}^{land}$ Factor de uso del suelo por instalaciones de generación, hm²/GWh.

$\phi_{i,j}^p$	Coeficiente de pérdidas por producción de energía en instalaciones generadoras según su tipo de tecnología.
$\tau_{i,i1}^{\text{let}}$	Coeficiente de pérdida por transmisión de energía.
$\text{CapCost}_{i,j1}^e$	Costo de capital para las instalaciones existentes, MMUSD.
$\text{CINV}_{i,j2}$	Coste de inversión para nuevas instalaciones, MMUSD/GWh.
$\text{DE}_{i,t}$	Demanda de energía en la región i durante el período de tiempo t , GWh.
$ee_{i,t}^{\text{cap}}$	Capacidad de las líneas de exportación de energía, GWh.
$\text{GE}_{i,j2}^{\text{capn}}$	Capacidad máxima de generación de energía para nuevas instalaciones, GWh.
$\text{GE}_{i,j,t}^{\text{max}}$	Máxima energía generada en las instalaciones generadoras de energía según su tipo de tecnología, GWh.
$\text{GE}_{i,j,t}^{\text{min}}$	Energía mínima generada en las instalaciones generadoras de energía según su tipo de tecnología, GWh.
$\text{gescap}_{i,i1,t}$	Capacidad de las líneas de transmisión para la energía enviada de la región i a $i1$ en el período t , GWh.
$\text{gesncap}_{i,i1,t}$	Capacidad de las nuevas líneas de transmisión para la energía enviada de la región i a $i1$ en el período t , GWh.
IC_i	Costo promedio anual por región de control de importación de energía, MMUSD/GWh.
$ie_{i,t}^{\text{cap}}$	Capacidad de las líneas de exportación de energía, GWh.

k_F	Factor utilizado para anualizar los costos de capital.
$L_{i,i1}^{nl}$	Longitud de las líneas de transmisión eléctrica, km.
$M_{i,i1}^{nl}$	Factor que considera el costo por km de línea de transmisión eléctrica, MMUSD/km.
$POW_{i,j1}^e$	Potencia de las instalaciones energéticas existentes, GW.
TC	Coste medio anual del transporte energético, MMUSD/GWh.
$UFC_{i,j1}$	Coste fijo unitario para instalaciones energéticas, MMUSD/GWh.
$UVC_{i,j1}$	Coste unitario variable para instalaciones energéticas, MMUSD/GWh.
Z_i^{exp}	Parámetro binario para la energía exportada.
Z_i^{imp}	Parámetro binario para energía importada.
$Z_{s,i,i1}$	Parámetro binario para la interconexión de regiones donde hay suministro de energía.

9.3 Variables

$CapCost_{i,j2}^n$	Costo de capital para instalaciones existentes, MMUSD/año.
$Cnl_{i,j1}$	Costos para la instalación de nuevas líneas de transmisión, MMUSD.
$ee_{i,t}$	Energía exportada desde la región i durante el período t , a un agente externo, GWh.
$EmPlant_{i,j}$	Emissiones de la planta j en la región i , tonelada/año.

$f_{i,j,t}^f$	Recurso disponible utilizado en instalaciones generadoras de energía según su tipo de tecnología, toneladas, hm ³ , hm ² .
$gec_{i,t}$	Electricidad consumida en la zona i , en el período t , GWh.
$ges_{i,i1,t}$	Energía enviada de la región i a $i1$ en el período t , GWh.
$gesn_{i,i1}$	Energía enviada para nuevas líneas de transmisión de la región i a $i1$, GWh.
$GE_{i,t}^P$	Energía generada en la región i , en el período t , GWh.
$GE_{i,j,t}^P$	Energía generada en la región i , en instalaciones nuevas y existentes j , en el período t , GWh.
$ICost_i$	Costos de la energía importada a una región i , MMUSD/año.
$ie_{i,t}$	Energía importada a la región i en el período t , de un agente externo, GWh.
$LandPlant_{i,j}$	Terreno utilizado por las instalaciones de generación de energía, hm ² / año.
$loste_{i,j,t}^p$	Pérdida de energía por producción en cada región i , en las instalaciones generadoras de energía según su tipo de tecnología, en el periodo t , GWh.
$loste_{i,t}^{trans}$	Pérdida de energía por transmisión en cada región i , en el período t , GWh.
$OptCost_{i,j}$	Coste de explotación de las diferentes instalaciones de generación de energía, MMUSD/año.
$POW_{i,j2}^n$	Potencia de las instalaciones de nueva energía, GW.
$TCost_{i,i1}$	Costes de la energía transportada de una región i a $i1$, MMUSD/año.
TAC	Coste total anual, MMUSD/año.
TEm	Emisiones anuales totales, toneladas/año.

TLa	Terreno total utilizado, hm ² /año.
$TWater$	Consumo total anual de agua, hm ³ /año.
$WaterPlant_{i,j}$	Consumo de agua de las instalaciones de generación de energía, hm ³ / año.

9.4 Variables binarias

$y_{i,j}$	Variable binaria que indica que se debe utilizar o no una instalación (j).
$y_{i,j1}$	Variable binaria que indica que una instalación existente ($j1$) debe o no ser utilizada en el futuro.
$y_{i,j2}$	Variable binaria que indica que una nueva instalación ($j2$) debe o no ser utilizada en el futuro.
$y_{i,i1}^{nl}$	Variable binaria que identifica si se utilizará una nueva línea de transmisión de energía.

10 REFERENCIAS

- Achnib, A., & Amghar, B. (2023). Optimal Control-Based Energy Management in a Real Smart Grid. *2023 IEEE 3rd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control, STPEC 2023*. <https://doi.org/10.1109/STPEC59253.2023.10431289>
- Adelekan, O. A., Ilugbusi, B. S., Adisa, O., Obi, O. C., Awonuga, K. F., Asuzu, O. F., & Ndubuisi, N. L. (2024). ENERGY TRANSITION POLICIES: A GLOBAL REVIEW OF SHIFTS TOWARDS RENEWABLE SOURCES. *Engineering Science & Technology Journal*, *5*(2), 272–287. <https://doi.org/10.51594/ESTJ.V5I2.752>
- Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., & Chen, H. (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, *289*, 125834. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.125834>
- Albogamy, F. R., Hafeez, G., Khan, I., Khan, S., Alkhamash, H. I., Ali, F., & Rukh, G. (2021). Efficient Energy Optimization Day-Ahead Energy Forecasting in Smart Grid Considering Demand Response and Microgrids. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 11429, 13*(20), 11429. <https://doi.org/10.3390/SU132011429>
- Alexander, N.-R. (2024). Green Jobs and the Future of Work for Women and Men. *Staff Discussion Notes*, *2024*(003), 1. <https://doi.org/10.5089/9798400286049.006>
- Algunaibet, I. M., & Guillén-Gosálbez, G. (2019). Life cycle burden-shifting in energy systems designed to minimize greenhouse gas emissions: Novel analytical method and application to the United States. *Journal of Cleaner Production*, *229*, 886–901. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.276>
- Alhindawi, R., Nahleh, Y. A., Kumar, A., & Shiwakoti, N. (2020). Projection of Greenhouse Gas Emissions for the Road Transport Sector Based on Multivariate Regression and the Double Exponential Smoothing Model. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 9152, 12*(21), 9152. <https://doi.org/10.3390/SU12219152>

- Allman, A., & Daoutidis, P. (2017). Optimal design of synergistic distributed renewable fuel and power systems. *Renewable Energy*, 100, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.051>
- Alotaibi, I., Abido, M. A., Khalid, M., & Savkin, A. V. (2020). A Comprehensive Review of Recent Advances in Smart Grids: A Sustainable Future with Renewable Energy Resources. *Energies*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/EN13236269>
- Altukhova, E. V. (2024). Today's Mechanisms of Financing the 4th Energy-Transition. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 3, 127–133. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2024-3-127-133>
- Arana-Landín, G., Landeta-Manzano, B., Peña-Lang, M. B., & Uriarte-Gallastegi, N. (2020). Trend in environmental impact of the energy produced and distributed by wind power systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(5), 1041–1054. <https://doi.org/10.1007/S10098-020-01863-6/METRICS>
- Arapostathis, S., Carlsson-Hyslop, A., Pearson, P. J. G., Thornton, J., Gradillas, M., Laczay, S., & Wallis, S. (2013). Governing transitions: Cases and insights from two periods in the history of the UK gas industry. *Energy Policy*, 52, 25–44. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.08.016>
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., D'Alessandro, F., & Scrucca, F. (2015). Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1113–1122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.082>
- Atilgan, B., & Azapagic, A. (2017). Energy challenges for Turkey: Identifying sustainable options for future electricity generation up to 2050. *Sustainable Production and Consumption*, 12, 234–254. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.02.001>
- Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., Nilsson, L. J., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Stiebert, S., Waisman, H., Sartor, O., & Rahbar, S. (2018). A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris

- Agreement. *Journal of Cleaner Production*, 187, 960–973.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.107>
- Bauknecht, D., Andersen, A. D., & Dunne, K. T. (2020). Challenges for electricity network governance in whole system change: Insights from energy transition in Norway. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 37, 318–331.
<https://doi.org/10.1016/J.EIST.2020.09.004>
- Bistline, J. E. T., & Blanford, G. J. (2020). Value of technology in the U.S. electric power sector: Impacts of full portfolios and technological change on the costs of meeting decarbonization goals. *Energy Economics*, 86.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2020.104694>
- Bistline, J. E. T., & Blanford, G. J. (2021). The role of the power sector in net-zero energy systems. *Energy and Climate Change*, 2, 100045.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYCC.2021.100045>
- Blanco, H., Codina, V., Laurent, A., Nijs, W., Maréchal, F., & Faaij, A. (2020). Life cycle assessment integration into energy system models: An application for Power-to-Methane in the EU. *Applied Energy*, 259, 114160.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114160>
- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., & Breyer, C. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120467>
- Braga, J. P., & Ernst, E. (2023). Financing the green transition. The role of macro-economic policies in ensuring a just transition. *Frontiers in Climate*, 5.
<https://doi.org/10.3389/FCLIM.2023.1192706>
- Bruckner, T., Bashmakov, I. A., Mulugetta, Y., Chum, H., De la Vega Navarro, A., Edmonds, J., Faaij, A., Functamman, B., Garg, A., Hertwich, E., Honnery, D., Infield, D., Kainuma, M., Khennas, S., Kim, S., Nimir, H. B., Riahi, K., Strachan, N.,

- Wiser, R., & Zhang, X. (2014). *Chapter 7 - Energy systems*. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter7.pdf
- Bucur, C., Tudorica, B. G., Oprea, S. V., Nancu, D., & Dusmanescu, D. M. (2021). Insights into Energy Indicators Analytics towards European Green Energy Transition Using Statistics and Self-Organizing Maps. *IEEE Access*, 9, 64427–64444. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075175>
- Bulkot, O., Liubkina, O., Anisimova, L., & Petrovsky, M. (2023). INVESTING IN RENEWABLE ENERGY TRANSITION AS A KEY TREND IN THE GLOBAL ECONOMY. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Economics*, 223, 10–19. <https://doi.org/10.17721/1728-2667.2023/223-2/2>
- Burak, A., & Eldar, D. (2024). Sustainable Power Solutions: Renewable Energy & Storage Advancements. *Journal of Science & Technology*, 4(6), 13–34. <https://doi.org/10.55662/JST.2023.4602>
- Bynoe, P., & Moonsammy, S. (2023). Energy transition in a developing economy: Challenges, prospects and policy considerations. *Natural Resources Conservation and Research*, 6(2), 2369. <https://doi.org/10.24294/NRCR.V6I2.2369>
- Caponetti, S. (2023). Jobs, Green Deal and Sustainability. *Athens Journal of Law*, 9(2). <https://doi.org/10.30958/ajl.9-2-6>
- Carley, S., & Konisky, D. M. (2020). The justice and equity implications of the clean energy transition. *Nature Energy 2020* 5:8, 5(8), 569–577. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0641-6>
- CENACE. (2019). *National energy balance*. <https://Datos.Gob.Mx/Busca/Dataset/Consumo-Mensual-Bruto-Del-Sistema-Elctrico-Nacional>.
- Cherubini, F. (2010). GHG balances of bioenergy systems – Overview of key steps in the production chain and methodological concerns. *Renewable Energy*, 35(7), 1565–1573. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2009.11.035>

- Chigarev, B. N. (2024). Identification of topical issues of the energy transition in publications of the scientific content aggregator Scilit. Part 2. Keyword clustering. *Actual Problems of Oil and Gas*, 15(2), 174–199. <https://doi.org/10.29222/IPNG.2078-5712.2024-15-2.ART5>
- Costa, C. M., Barbosa, J. C., Gonçalves, R., Castro, H., Campo, F. J. D., & Lanceros-Méndez, S. (2021). Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Energy Storage Materials*, 37, 433–465. <https://doi.org/10.1016/J.ENSM.2021.02.032>
- Creutzig, F., Niamir, L., Bai, X., Cullen, J., Díaz-José, J., Figueroa, M., Grübler, A., Lamb, W., Leip, A., Masanet, E., Mata, E., Mattauch, L., Minx, J., Mirasgedis, S., Mulugetta, Y., Nugroho, S., Pathak, M., Perkins, P., Roy, J., ... Ürge-Vorsatz, D. (2021). *Demand-side solutions to climate change mitigation consistent with high levels of wellbeing*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-127928/V1>
- De Pascali, P., & Bagaini, A. (2018). Energy Transition and Urban Planning for Local Development. A Critical Review of the Evolution of Integrated Spatial and Energy Planning. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 35, 12(1), 35. <https://doi.org/10.3390/EN12010035>
- Diezmartínez, C. V. (2021). Clean energy transition in Mexico: Policy recommendations for the deployment of energy storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110407. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110407>
- Dizdaroglu, D. (2017). The Role of Indicator-Based Sustainability Assessment in Policy and the Decision-Making Process: A Review and Outlook. *Sustainability* 2017, Vol. 9, Page 1018, 9(6), 1018. <https://doi.org/10.3390/SU9061018>
- Dowling, A. W., Kumar, R., & Zavala, V. M. (2017). A multi-scale optimization framework for electricity market participation. *Applied Energy*, 190, 147–164. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.081>
- ecoinvent v3.11* - *ecoinvent*. (n.d.). Retrieved January 7, 2025, from <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-11/>

- El Mekaoui, A., Tariq, R., Ramírez, O. B., & Méndez-Monroy, P. E. (2020). Sustainability, Sociocultural Challenges, and New Power of Capitalism for Renewable Energy Megaprojects in an Indigenous Mayan Community of Mexico. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 7432, 12(18), 7432. <https://doi.org/10.3390/SU12187432>
- Epelle, E. I., & Gerogiorgis, D. I. (2020). A review of technological advances and open challenges for oil and gas drilling systems engineering. *AIChE Journal*, 66(4), e16842. <https://doi.org/10.1002/AIC.16842>
- Feng, K., Hubacek, K., Siu, Y. L., & Li, X. (2014). The energy and water nexus in Chinese electricity production: A hybrid life cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 342–355. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.080>
- Ferris, M. C. (1999a). *MATLAB and GAMS: Interfacing Optimization and Visualization Software*. <http://digital.library.wisc.edu/1793/64396>
- Ferris, M. C. (1999b). *MATLAB and GAMS: Interfacing Optimization and Visualization Software*. <http://digital.library.wisc.edu/1793/64396>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2009.06.018>
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Lujckx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., ... Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/ESSD-14-4811-2022>
- García Hernández, A. L., & Lucatello, S. (2022). Climate policy integration: taking advantage of policy windows? An analysis of the energy and environment sectors in Mexico (1997–2018). *Journal of Environmental Policy & Planning*, 24(1), 56–67. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1940893>

- García-García, P., Carpintero, Ó., & Buendía, L. (2020). Just energy transitions to low carbon economies: A review of the concept and its effects on labour and income. *Energy Research & Social Science*, 70, 101664. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2020.101664>
- Geels, F. W. (2018). Disruption and low-carbon system transformation: Progress and new challenges in socio-technical transitions research and the Multi-Level Perspective. *Energy Research & Social Science*, 37, 224–231. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2017.10.010>
- Gegenheimer, A., & Gegenheimer, C. M. (2021). Harnessing Small Country Collaboration Opportunities to Advance Energy Innovation and Joint Investments. *Sustainable Energy Investment - Technical, Market and Policy Innovations to Address Risk*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.90348>
- Genc, T. S., & Kosempel, S. (2023). Energy Transition and the Economy: A Review Article. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 2965, 16(7), 2965. <https://doi.org/10.3390/EN16072965>
- GeoComunes. (2021). *Illuminating the contradictions of the Mexican Electricity System and the energy transition: Key questions to understand them and build other energy models*. [Http://Geocomunes.Org/Visualizadores/SistemaElectricoMexico/](http://Geocomunes.Org/Visualizadores/SistemaElectricoMexico/).
- Gidden, M. J., Riahi, K., Smith, S. J., Fujimori, S., Luderer, G., Kriegler, E., Van Vuuren, D. P., Van Den Berg, M., Feng, L., Klein, D., Calvin, K., Doelman, J. C., Frank, S., Fricko, O., Harmsen, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Hilaire, J., Hoesly, R., ... Takahashi, K. (2019). Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geoscientific Model Development*, 12(4), 1443–1475. <https://doi.org/10.5194/GMD-12-1443-2019>
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). *The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment*.

- Göransson, L., Lehtveer, M., Nyholm, E., Taljegard, M., & Walter, V. (2019). The Benefit of Collaboration in the North European Electricity System Transition—System and Sector Perspectives. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 4648, 12(24), 4648. <https://doi.org/10.3390/EN12244648>
- Grande-Acosta, G. K., Islas-Samperio, J. M., & Carrasco-González, F. (2024). Energy Transition Policy of the Mexican Electricity Sector: A Representation in Terms of the Theory of Change. *Energies*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/EN17215259>
- Hafner, M., & Tagliapietra, S. (2020). The Global Energy Transition: A Review of the Existing Literature. *Lecture Notes in Energy*, 73, 1–24. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39066-2_1
- Hellweg, S., & Canals, L. M. I. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science (New York, N.Y.)*, 344(6188), 1109–1113. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1248361>
- Hercegová, K., Baranovskaya, T., & Efanova, N. (2021). Smart technologies for energy consumption management. *SHS Web of Conferences*, 128, 02005. <https://doi.org/10.1051/SHSCONF/202112802005>
- Hernandez, A. M., Pacheco Rojas, D. A., & Barrón Villaverde, D. (2021). *Carbon Lock-in and Contradictions – Teaching Mexico’s Energy Transition*. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202106.0286.V1>
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(9), 3232–3237. https://doi.org/10.1073/PNAS.1109936109/SUPPL_FILE/PNAS.1109936109_SI.PDF
- Hong, J. H., Kim, J., Son, W., Shin, H., Kim, N., Lee, W. K., & Kim, J. (2019). Long-term energy strategy scenarios for South Korea: Transition to a sustainable energy system. *Energy Policy*, 127, 425–437. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.11.055>

- Icaza-Alvarez, D., Galan-Hernandez, N. D., Orozco-Guillen, E. E., & Jurado, F. (2023). Smart Energy Planning in the Midst of a Technological and Political Change towards a 100% Renewable System in Mexico by 2050. *Energies*, 16(20). <https://doi.org/10.3390/EN16207121/S1>
- Jamasb, T., Llorca, M., Meeus, L., & Schittekatte, T. (2021). Energy Network Innovation for Green Transition: Economic Issues and Regulatory Options. *Danish Utility Regulator's Anthology Project Series on Better Regulation in the Energy Sector*, 1(1). <https://doi.org/10.51138/UMNP7884>
- Jamshidi, F., Ghiasi, M., Mehrandezh, M., Wang, Z., & Paranjape, R. (2024). Optimizing Energy Consumption in Agricultural Greenhouses: A Smart Energy Management Approach. *Smart Cities 2024*, Vol. 7, Pages 859-879, 7(2), 859–879. <https://doi.org/10.3390/SMARTCITIES7020036>
- Jasanoff, S., & Kim, S.-H. (2015). *Dreamscapes of Modernity: Sociotechnical Imaginaries and the Fabrication of Power*. Chicago: University of Chicago Press.
- Jenkins, K. E. H., Sovacool, B. K., Mouter, N., Hacking, N., Burns, M.-K., & McCauley, D. (2021). The methodologies, geographies, and technologies of energy justice: A systematic and comprehensive review. *Environmental Research Letters*, 16(4), 43009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd78c>
- Jiang, L., & Shen, S. (2024). Opportunity or Curse: Can Green Technology Innovation Stabilize Employment? *Sustainability 2024*, Vol. 16, Page 5805, 16(13), 5805. <https://doi.org/10.3390/SU16135805>
- Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A., & Scherer, L. (2019). Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109391. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.743114>

- Kamath, D., Arsenault, R., Kim, H. C., & Anctil, A. (2020). Economic and Environmental Feasibility of Second-Life Lithium-Ion Batteries as Fast-Charging Energy Storage. *Environmental Science and Technology*, *54*(11), 6878–6887. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.9B05883/SUPPL_FILE/ES9B05883_SI_001.PDF
- Kang, J. N., Wei, Y. M., Liu, L. C., Han, R., Yu, B. Y., & Wang, J. W. (2020). Energy systems for climate change mitigation: A systematic review. *Applied Energy*, *263*, 114602. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114602>
- Kebede, A. A., Coosemans, T., Messagie, M., Jemal, T., Behabtu, H. A., Van Mierlo, J., & Berecibar, M. (2021). Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application. *Journal of Energy Storage*, *40*, 102748. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102748>
- Keith, A. J., & Ahner, D. K. (2019). A survey of decision making and optimization under uncertainty. *Annals of Operations Research 2019 300:2*, *300*(2), 319–353. <https://doi.org/10.1007/S10479-019-03431-8>
- Kim, K., & Zavala, V. M. (2016). Large-Scale Stochastic Mixed-Integer Programming Algorithms for Power Generation Scheduling. In *Alternative Energy Sources and Technologies* (pp. 493–512). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28752-2_18
- Kotsampopoulos, P., Dimeas, A., Chronis, A., Saridaki, G., Hatziargyriou, N., Maiti, S., & Chakraborty, C. (2022). EU-India Collaboration for Smarter Microgrids: RE-EMPOWERED project. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2022-October*. <https://doi.org/10.1109/ISGT-EUROPE54678.2022.9960371>
- Kovač, A., Paranos, M., & Marciuš, D. (2021). Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(16), 10016–10035. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.11.256>
- Krause, J., Myroshnychenko, I., Tiutiunyk, S., & Latysh, D. (2024). Financial Instruments of the Green Energy Transition: Research Landscape Analysis. *Financial Markets*,

Institutions and Risks, 8(2), 198–212. [https://doi.org/10.61093/FMIR.8\(2\).198-212.2024](https://doi.org/10.61093/FMIR.8(2).198-212.2024)

Laurent, A., Olsen, S. I., & Hauschild, M. Z. (2012). Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability. *Environmental Science and Technology*, 46(7), 4100–4108. https://doi.org/10.1021/ES204163F/SUPPL_FILE/ES204163F_SI_001.PDF

Lee, D., & Joo, S. K. (2023). Economic Analysis of Large-Scale Renewable Energy (RE) Source Investment Incorporating Power System Transmission Costs. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 7407, 16(21), 7407. <https://doi.org/10.3390/EN16217407>

Lin, M. X., Liou, H. M., & Chou, K. T. (2020). National Energy Transition Framework toward SDG7 with Legal Reforms and Policy Bundles: The Case of Taiwan and Its Comparison with Japan. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 1387, 13(6), 1387. <https://doi.org/10.3390/EN13061387>

Liu, L., Wang, D., Hou, K., Jia, H. jie, & Li, S. yuan. (2020). Region model and application of regional integrated energy system security analysis. *Applied Energy*, 260, 114268. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114268>

Lu, J., & Nemet, G. F. (2020). Evidence map: topics, trends, and policy in the energy transitions literature. *Environmental Research Letters*, 15(12), 123003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABC195>

Manoj Kumar, N., Chopra, S. S., Chand, A. A., Elavarasan, R. M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hybrid Renewable Energy Microgrid for a Residential Community: A Techno-Economic and Environmental Perspective in the Context of the SDG7. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 3944, 12(10), 3944. <https://doi.org/10.3390/SU12103944>

Manthiram, A. (2011). Materials challenges and opportunities of lithium ion batteries. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2(3), 176–184. https://doi.org/10.1021/JZ1015422/ASSET/IMAGES/MEDIUM/JZ-2010-015422_0009.GIF

- Markard, J. (2018). The next phase of the energy transition and its implications for research and policy. *Nature Energy* 2018 3:8, 3(8), 628–633. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0171-7>
- Martínez-Cruz, A. L., & Núñez, H. M. (2021). Tension in Mexico's energy transition: Are urban residential consumers in Aguascalientes willing to pay for renewable energy and green jobs? *Energy Policy*, 150, 112145. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112145>
- McCollum, D. L., Zhou, W., Bertram, C., De Boer, H. S., Bosetti, V., Busch, S., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Fay, M., Fricko, O., Fujimori, S., Gidden, M., Harmsen, M., Huppmann, D., Iyer, G., Krey, V., Kriegler, E., Nicolas, C., ... Riahi, K. (2018). Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Energy* 2018 3:7, 3(7), 589–599. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0179-z>
- McGrath, E., O'donnell, E., & Torremans, K. (2023). Digging our way to a Just Transition. *Geological Society Special Publication*, 526, 175–182. <https://doi.org/10.1144/SP526-2022-201>
- Miao, C., Fang, D., Sun, L., Luo, Q., & Yu, Q. (2018). Driving effect of technology innovation on energy utilization efficiency in strategic emerging industries. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1177–1184. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.09.225>
- Michael Olatunde, T., Chukwudi Okwandu, A., Oluwajuwonlo Akande, D., & Queen Sikhakhane, Z. (2024). THE IMPACT OF SMART GRIDS ON ENERGY EFFICIENCY: A COMPREHENSIVE REVIEW. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(4), 1257–1269. <https://doi.org/10.51594/ESTJ.V5I4.1016>
- Mikulčić, H., Baleta, J., Klemeš, J. J., & Wang, X. (2021). Energy transition and the role of system integration of the energy, water and environmental systems. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126027. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126027>

- Miller, C. A., Richter, J., & O’Leary, J. (2015). Socio-energy systems design: A policy framework for energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 6, 29–40. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2014.11.004>
- Miller, M. (2018). Electrification: Its role in deeply decarbonized energy systems [guest editorial]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 16(4), 20–21. <https://doi.org/10.1109/MPE.2018.2824099>
- Mistry, A. (2023). The (annoyingly) slow pace of energy transition. *MRS Bulletin 2023* 48:6, 48(6), 688–689. <https://doi.org/10.1557/S43577-023-00542-3>
- Mora-Jacobo, E. G., Tovar-Facio, J., & Ponce-Ortega, J. M. (2023). Optimal planning for power systems considering the interconnections between isolated regions. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03074-7>
- Moraliyska, M. (2023). MEASURING THE JUSTNESS OF THE EUROPEAN GREEN TRANSITION. *COLLECTION OF PAPERS NEW ECONOMY*, 1(1), 30–41.
- Naceur, F. Ben, Toumi, S., Ben Salah, C., Mahjoub, M. A., & Tlija, M. (2024). Decision-making solutions based artificial intelligence and hybrid software for optimal sizing and energy management in a smart grid system. *Concurrent Engineering Research and Applications*. <https://doi.org/10.1177/1063293X241266338>
- Nadeem, M., Bahavarnia, M., & Taha, A. F. (2024). Robust Feedback Control of Power Systems with Solar Plants and Composite Loads. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(3), 4949–4962. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3323222>
- Nadel, S. (2019). Electrification in the Transportation, Buildings, and Industrial Sectors: a Review of Opportunities, Barriers, and Policies. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6(4), 158–168. <https://doi.org/10.1007/S40518-019-00138-Z/METRICS>
- Nagatomo, Y., Ozawa, A., Kudoh, Y., & Hondo, H. (2021). Impacts of employment in power generation on renewable-based energy systems in Japan— Analysis using an

energy system model. *Energy*, 226, 120350.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120350>

Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 60(3), 498–508.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2006.07.023>

Nieto, J., Carpintero, Ó., Miguel, L. J., & de Blas, I. (2020). Macroeconomic modelling under energy constraints: Global low carbon transition scenarios. *Energy Policy*, 137, 111090. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.111090>

Omotoye, G. B., Bello, B. G., Tula, S. T., Kess-Momoh, A. J., Daraojimba, A. I., Adefemi, A., Omotoye, G. B., Bello, B. G., Tula, S. T., Kess-Momoh, A. J., Daraojimba, A. I., & Adefemi, A. (2024). Navigating global energy markets: A review of economic and policy impacts. *International Journal of Science and Research Archive*, 11(1), 195–203. <https://doi.org/10.30574/IJSRA.2024.11.1.0029>

Onu, P., Mbohwa, C., & Pradhan, A. (2023). Advancements, Challenges, and Recommendations for Resilient and Decarbonized Future Smart Grids. *International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies, ICECET 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICECET58911.2023.10389344>

Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., & Kalogirou, S. (2020). Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy*, 146, 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.08.094>

Paltsev, S., Morris, J., Kheshgi, H., & Herzog, H. (2021). Hard-to-Abate Sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation. *Applied Energy*, 300, 117322. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.117322>

Park, S., & Bishara, N. D. (2023). Climate Change and a Just Transition to the Future of Work. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.4640882>

Pasman, H., Sripaul, E., Khan, F., & Fabiano, B. (2023). Energy transition technology comes with new process safety challenges and risks. *Process Safety and*

Environmental Protection, 177, 765–794.
<https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2023.07.036>

Peñalvo-López, E., Pérez-Navarro, Á., Hurtado, E., & Cárcel-Carrasco, F. J. (2019). Comprehensive Methodology for Sustainable Power Supply in Emerging Countries. *Sustainability* 2019, Vol. 11, Page 5398, 11(19), 5398.
<https://doi.org/10.3390/SU11195398>

Peters, G. P. (2010). Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(4), 245–250.
<https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2010.05.004>

Pfenninger, S., DeCarolis, J., Hirth, L., Quoilin, S., & Staffell, I. (2017). The importance of open data and software: Is energy research lagging behind? *Energy Policy*, 101, 211–215. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2016.11.046>

Plötz, P., Wachsmuth, J., Sprei, F., Gnann, T., Speth, D., Neuner, F., & Link, S. (2023). Greenhouse gas emission budgets and policies for zero-Carbon road transport in Europe. *Climate Policy*, 23(3), 343–354.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2185585>

Posadas-Paredes, T., Mora-Jacobo, E. G., Ramírez-Márquez, C., & Ponce-Ortega, J. M. (2024). Analyzing Mexico's Planting Life Program: Forest plantations for carbon reduction and energy optimization. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 197, 109694. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2024.109694>

Rakhmatov, A., Primov, O., Mamadaliyev, M., Tòrayev, S., Xudoynazarov, U., Xaydarov, S., Ulugmurodov, E., & Razzoqov, I. (2024). Advancements in renewable energy sources (solar and geothermal): A brief review. *E3S Web of Conferences*, 497, 01009. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202449701009>

Ram, M., Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2020). Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050. *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119682.
<https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2019.06.008>

- Rashedi, A., & Khanam, T. (2020). Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 29075–29090. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-09194-1>/METRICS
- Rehbein, J. A., Watson, J. E. M., Lane, J. L., Sonter, L. J., Venter, O., Atkinson, S. C., & Allan, J. R. (2020). Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas. *Global Change Biology*, 26(5), 3040–3051. <https://doi.org/10.1111/GCB.15067>
- Reid, J., & Rout, M. (2020). Developing sustainability indicators – The need for radical transparency. *Ecological Indicators*, 110, 105941. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2019.105941>
- Rezaeimozafar, M., Eskandari, M., Amini, M. H., Moradi, M. H., & Siano, P. (2020). A Bi-Layer Multi-Objective Techno-Economical Optimization Model for Optimal Integration of Distributed Energy Resources into Smart/Micro Grids. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 1706, 13(7), 1706. <https://doi.org/10.3390/EN13071706>
- Robertson Munro, F., & Cairney, P. (2020). A systematic review of energy systems: The role of policymaking in sustainable transitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109598. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109598>
- Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., & Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 2016 534:7609, 534(7609), 631–639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>
- Rogge, K. S., Pfluger, B., & Geels, F. W. (2020). Transformative policy mixes in socio-technical scenarios: The case of the low-carbon transition of the German electricity system (2010–2050). *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119259. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2018.04.002>
- Roychoudhury, J., Hatipoglu, E., & Yilmaz, F. (2022). *Enhancing ESG Frameworks to Scale Up Climate Finance*.

- Santos Ayllón, L. M., & Jenkins, K. E. H. (2023). Energy justice, Just Transitions and Scottish energy policy: A re-grounding of theory in policy practice. *Energy Research & Social Science*, 96, 102922. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2022.102922>
- Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., & Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), 1488–1499. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.018>
- Sayed, E. T., Wilberforce, T., Elsaid, K., Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Chae, K. J., & Olabi, A. G. (2021). A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of The Total Environment*, 766, 144505. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144505>
- Secretary of Energy. (2024). *National Electric System Development Program 2024 - 2038*. <https://base.energia.gob.mx/PRODESEN2024/prodesen24-38cap3.PDF>
- SENER. (2018). *Development Program of the National Electric System*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-Definitiva.Pdf>.
- SENER. (2020). *Energy Information System*. <http://sie.energia.gob.mx/BdiController.Do?Action=cuadro&subAction=applyOptions>.
- Shah, S. (2024). Recent Trends in Renewable Energy Adoption and their Economic Implications. *Premier Journal of Environmental Science*, 1. <https://doi.org/10.70389/PJES.100004>
- Shreenidhi, H. S., Upadhyay, S., & Gill, A. (2024). The Potential of Industrial Smart Grids in Optimizing Energy Consumption. *International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, 1352–1358. <https://doi.org/10.1109/CSNT60213.2024.10545742>

- Sidhu, A. S., Pollitt, M. G., & Anaya, K. L. (2018). A social cost benefit analysis of grid-scale electrical energy storage projects: A case study. *Applied Energy*, 212, 881–894. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.12.085>
- Somepalli, S. (2024). Implementing Smart Grid Technology in Developing Countries: Challenges, Opportunities, and Pathways to Sustainable Energy Solutions USA. *J Eng App Sci Technol*, 6(3), 1–4. [https://doi.org/10.47363/JEAST/2024\(6\)E109](https://doi.org/10.47363/JEAST/2024(6)E109)
- Soyombo, O. T., Odunaiya, O. G., Abioye, K. M., & Adeleke, A. G. (2024). SME collaboration models for accelerating clean energy innovations: Insights from emerging market economies. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(9), 3134–3149. <https://doi.org/10.51594/IJMER.V6I9.1584>
- Stilwell, F. (2021). From green jobs to Green New Deal: What are the questions? <https://doi.org/10.1177/10353046211009774>, 32(2), 155–169. <https://doi.org/10.1177/10353046211009774>
- Stokes, L. C., & Breetz, H. L. (2018). Politics in the U.S. energy transition: Case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy. *Energy Policy*, 113, 76–86. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2017.10.057>
- Sun, Z., Zhang, F., Wang, Y., & Shao, Z. (2023). Literature review and analysis of the social impact of a just energy transition. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1119877. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2023.1119877/BIBTEX>
- Szczepaniuk, H., & Szczepaniuk, E. K. (2022). Applications of Artificial Intelligence Algorithms in the Energy Sector. *Energies 2023, Vol. 16, Page 347*, 16(1), 347. <https://doi.org/10.3390/EN16010347>
- Taghizadeh-Hesary, F., & Yoshino, N. (2020a). Sustainable Solutions for Green Financing and Investment in Renewable Energy Projects. *Energies 2020, Vol. 13, Page 788*, 13(4), 788. <https://doi.org/10.3390/EN13040788>

- Taghizadeh-Hesary, F., & Yoshino, N. (2020b). Sustainable Solutions for Green Financing and Investment in Renewable Energy Projects. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 788, 13(4), 788. <https://doi.org/10.3390/EN13040788>
- Tanaka, K., & O'Neill, B. C. (2018). The Paris Agreement zero-emissions goal is not always consistent with the 1.5 °C and 2 °C temperature targets. *Nature Climate Change* 2018 8:4, 8(4), 319–324. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0097-x>
- Tanaka, Y., Chapman, A., Tezuka, T., & Sakurai, S. (2020). Putting the process into the policy mix: Simulating policy design for energy and electricity transitions in Japan. *Energy Research & Social Science*, 70, 101702. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2020.101702>
- Telegina, E. A., & Khalova, G. O. (2022). GEOECONOMIC AND GEOPOLITICAL CHALLENGES OF ENERGY TRANSITION. IMPLICATIONS FOR WORLD ECONOMY. *World Economy and International Relations*, 66(6), 26–34. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2022-66-6-26-34>
- Tian, X., Meyer, T., Lee, H., & You, F. (2020). Sustainable design of geothermal energy systems for electric power generation using life cycle optimization. *AIChE Journal*, 66(4), e16898. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aic.16898>
- Truffer, B., Schippl, J., & Fleischer, T. (2017). Decentering technology in technology assessment: prospects for socio-technical transitions in electric mobility in Germany. *Technological Forecasting and Social Change*, 122, 34–48. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2017.04.020>
- Ullah, K., Hafeez, G., Khan, I., Jan, S., & Javaid, N. (2021). A multi-objective energy optimization in smart grid with high penetration of renewable energy sources. *Applied Energy*, 299. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.117104>
- Uzundu, N. C., & Lele, D. D. (2024). Comprehensive analysis of integrating smart grids with renewable energy sources: Technological advancements, economic impacts, and policy frameworks. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(7), 2334–2363. <https://doi.org/10.51594/ESTJ.V5I7.1347>

- Vakulchuk, R., Overland, I., & Scholten, D. (2020). Renewable energy and geopolitics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, 109547. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109547>
- Vakulenko, I., Fritsak, M., & Fisunen, P. (2021). An Organizational Scheme for Scaling Innovative Energy Projects. Smart Grids Case. *Marketing and Management of Innovations*, 5(3), 149–164. <https://doi.org/10.21272/MMI.2021.3-13>
- von Lüpke, H., & Well, M. (2020). Analyzing climate and energy policy integration: the case of the Mexican energy transition. *Climate Policy*, 20(7), 832–845. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1648236>
- Vural, G. (2021). Analyzing the impacts of economic growth, pollution, technological innovation and trade on renewable energy production in selected Latin American countries. *Renewable Energy*, 171, 210–216. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.02.072>
- Wang, C., Li, X. wu, Wen, H. xing, & Nie, P. yan. (2021). Order financing for promoting green transition. *Journal of Cleaner Production*, 283. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125415>
- Wang, J. Q., Peng, J. juan, Zhang, H. yu, & Chen, X. hong. (2019). Outranking approach for multi-criteria decision-making problems with hesitant interval-valued fuzzy sets. *Soft Computing*, 23(2), 419–430. <https://doi.org/10.1007/S00500-017-2791-4/METRICS>
- Wei, M., McMillan, C. A., & de la Rue du Can, S. (2019). Electrification of Industry: Potential, Challenges and Outlook. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6(4), 140–148. <https://doi.org/10.1007/S40518-019-00136-1/METRICS>
- Weinand, J. M. (2020). Reviewing Municipal Energy System Planning in a Bibliometric Analysis: Evolution of the Research Field between 1991 and 2019. *Energies 2020*, Vol. 13, Page 1367, 13(6), 1367. <https://doi.org/10.3390/EN13061367>
- Wheatley, M. (2024). Advancements in Renewable Energy Technologies: A Decade in Review. *Premier Journal of Science*, 1. <https://doi.org/10.70389/PJS.100013>

- Witt, T., Dumeier, M., & Geldermann, J. (2020). Combining scenario planning, energy system analysis, and multi-criteria analysis to develop and evaluate energy scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118414. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118414>
- Xu, Y., Yan, C., Liu, H., Wang, J., Yang, Z., & Jiang, Y. (2020). Smart energy systems: A critical review on design and operation optimization. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102369. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102369>
- Yang, J. (2023). Comprehensive Analysis of Key Technologies for Smart Grid. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 76, 467–476. <https://doi.org/10.54097/53Y8C604>
- Yuan, J., Xu, Y., & Hu, Z. (2012). Delivering power system transition in China. *Energy Policy*, 50, 751–772. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.024>
- Yuan, M., Thellufsen, J. Z., Lund, H., & Liang, Y. (2021). The electrification of transportation in energy transition. *Energy*, 236, 121564. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121564>
- Zakeri, B., Paulavets, K., Barreto-Gomez, L., Echeverri, L. G., Pachauri, S., Boza-Kiss, B., Zimm, C., Rogelj, J., Creutzig, F., Ürge-Vorsatz, D., Victor, D. G., Bazilian, M. D., Fritz, S., Gielen, D., McCollum, D. L., Srivastava, L., Hunt, J. D., & Pouya, S. (2022). Pandemic, War, and Global Energy Transitions. *Energies 2022, Vol. 15, Page 6114*, 15(17), 6114. <https://doi.org/10.3390/EN15176114>
- Zavadskas, K., Zakeri, B., Gribkova, D., & Milshina, Y. (2022). Energy Transition as a Response to Energy Challenges in Post-Pandemic Reality. *Energies 2022, Vol. 15, Page 812*, 15(3), 812. <https://doi.org/10.3390/EN15030812>
- Zhang, A., Zhong, R. Y., Farooque, M., Kang, K., & Venkatesh, V. G. (2020). Blockchain-based life cycle assessment: An implementation framework and system architecture. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104512. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104512>

Zhao, N., & You, F. (2020). Can renewable generation, energy storage and energy efficient technologies enable carbon neutral energy transition? *Applied Energy*, 279, 115889. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115889>

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química	
Título del trabajo	Planificación estratégica para la transición energética sostenible	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Edgar Geovanni Mora Jacobo	0848496e@umich.mx
Director	Jose María Ponce Ortega	jose.ponce@umich.mx
Codirector	Javier Tovar Facio	jtovarf@uach.mx
Coordinador del programa	José Apolinar Cortés	jose.apolinar@umich.mx

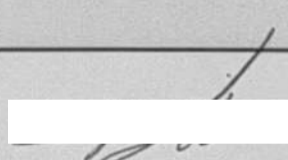
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante		
Nombre y firma	Edgar Geovanni Mora Jacobo	
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, México.	7 de marzo del 2025.

Edgar Geovanni Mora Jacobo

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA SOSTENIBLE.pdf

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:435786882

Fecha de entrega

3 mar 2025, 8:45 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

3 mar 2025, 9:05 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA SOSTENIBLE.pdf

Tamaño de archivo

3.1 MB

126 Páginas




30,780 Palabras

181,157 Caracteres

31% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 28%  Fuentes de Internet
- 22%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Caracteres reemplazados

48 caracteres sospechosos en N.º de páginas

Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.