



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Estudio de la Matriz Energética Mexicana: Una proyección
hacia una alternativa para el desarrollo sostenible

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnología Energética para Desarrollo
Sostenible

AUTOR/A: Martínez López, Paola Montserrat

Tutor/a: Peñalvo López, Elisa

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Instituto
Ingeniería
Energética



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

TECNOLOGÍA ENERGÉTICA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

ESTUDIO DE LA MATRIZ ENERGÉTICA MEXICANA: UNA PROYECCIÓN HACIA UNA ALTERNATIVA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

AUTOR: MARTÍNEZ LÓPEZ, PAOLA MONTSERRAT

TUTOR: PEÑALVO LÓPEZ, ELISA

Curso Académico: 2023-24

Fecha: 07/2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer infinitamente a quienes han sido parte fundamental para la culminación de este gran logro en mi vida.

A mis amados padres: Valentina López y Roberto Ayón. Gracias por todo su amor incondicional, su fe y apoyo constante en mi vida. Agradezco todo su sacrificio para darme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas. En realidad, mi culminación de estudios de posgrado es un logro compartido porque realmente siempre han estado a mi lado durante este trayecto.

A mis hermanos: Alexis Martínez y Aranza Martínez. Agradezco por brindarme su apoyo en todo momento y por todas sus palabras de motivación en mis momentos más complicados. Muchas gracias por ser mi respaldo incondicional, mi casita y con quienes siempre puedo contar.

A mi mejor amiga: Ailed Rodríguez. Agradezco por tu amistad desde hace más de 20 años. Desde que recuerdo, siempre has estado presente para cualquier evento, me siento orgullosa de ser tu amiga y agradecida por contar con tu presencia. Gracias por tus palabras optimistas ante mis adversidades, y también gracias por creer en mí.

A mi tutora: Elisa Peñalvo López. Gracias por tu guía en este viaje académico, tu dedicación y paciencia. Siempre tendré presente en mi día a día el mejor consejo que me has enseñado “Lo más importante es tener las cosas claras en la vida”. Tu apoyo ha sido fundamental para mí en este proyecto, pero más allá de eso, representas una fuente de inspiración y un ejemplo a seguir para mí por todo tu compromiso hacia tu profesión.

Escribo con nostalgia y felicidad por haber culminado este escalón en mi vida académica. Al mismo tiempo, estoy infinitamente agradecida de poder continuar avanzando en mi desarrollo profesional.

Sin más por el momento, gracias a todos por creer en mí y ser parte de mi camino.

RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo la elaboración de un plan de desarrollo sostenible a partir del análisis de la matriz energética mexicana actual. La realización del proyecto es capaz de brindar una referencia del punto de partida y una proyección hacia donde México podría ser capaz de desarrollarse en materia energética, lo que también podría ser aprovechado como línea de base para la toma de decisiones sobre la aplicación de futuros proyectos de sostenibilidad en la sociedad.

Durante el desarrollo del proyecto, se incentiva el posicionamiento de las energías limpias en diferentes zonas de México con el fin de garantizar el cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible descritos en la Agenda 2030. Específicamente, se da cumplimiento al ODS 7, brindando un acceso a la energía asequible y no contaminante.

Como punto de referencia se abarca un período de estudio del 2020-2035 del cual se realiza un escenario tendencial (BAU) para poder visualizar el panorama energético en México sin la aplicación de medidas de sostenibilidad, comparándose con un escenario sostenible basado mayormente en la implementación de energías renovables como fuente de generación eléctrica.

A partir de la elaboración de los escenarios es posible entender que el país depende estrechamente de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) para su generación eléctrica en aproximadamente el 80%. Por lo que la implementación de estrategias de sostenibilidad es fundamental para el desarrollo y soberanía energética de México.

La proyección del escenario de desarrollo sostenible se plantea considerando el contexto económico, gubernamental y ambiental de México a través del entendimiento de los antecedentes históricos del país. Actualmente, el territorio se encuentra en busca de una independencia energética debido a la inestabilidad de adquisición de los recursos fósiles porque normalmente son importados desde otros países.

Las medidas desarrolladas permiten la obtención de resultados satisfactorios con una contribución del 25% de las energías renovables como fuente de energía primaria en la matriz energética mexicana. Y se logra una disminución de emisiones de carbono de aproximadamente un 13% en comparación con el escenario tendencial.

En conclusión, se muestran los resultados de la transición energética sostenible de México a través de gráficas de Excel donde se comparan los indicadores entre el escenario tendencial (BAU) y el escenario sostenible. Se añade también una explicación de los gráficos con el fin de lograr un claro entendimiento de los valores mostrados.

Palabras Clave: Sostenibilidad, Energías renovables, Escenarios Energéticos, Matriz energética.

RESUM

El present document té com a objectiu l'elaboració d'un pla de desenvolupament sostenible a partir de l'anàlisi de la matriu energètica mexicana actual. La realització del projecte és capaç de brindar una referència del punt de partida i una projecció cap a on Mèxic podria ser capaç de desenvolupar-se en matèria energètica, la qual cosa també podria ser aprofitat com a línia de base per a la presa de decisions sobre l'aplicació de futurs projectes de sostenibilitat en la societat.

Durant el desenvolupament del projecte, s'incentiva el posicionament de les energies netes en diferents zones de Mèxic amb la finalitat de garantir el compliment als Objectius de Desenvolupament Sostenible descrits en l'Agenda 2030. Específicament, es dona compliment al **ODS 7**, brindant un accés a l'energia assequible i no contaminant. Com a punt de referència s'abasta un període d'estudi del 2020-2035 del qual es realitza un escenari tendencial (BAU) per a poder visualitzar el panorama energètic a Mèxic sense l'aplicació de mesures de sostenibilitat, comparant-se amb un escenari de sustentabilitat basat majorment en la implementació d'energies renovables com a font de generació elèctrica.

A partir de l'elaboració dels escenaris és possible entendre que el país depèn estretament de combustibles fòssils (gasolina i gas natural) per a la seua generació elèctrica, per la qual cosa la implementació d'estratègies de sostenibilitat són fonamentals per al desenvolupament i sobirania energètica de Mèxic.

La projecció de l'escenari de desenvolupament sostenible es planteja considerant el context econòmic, governamental i ambiental de Mèxic a través de l'enteniment dels antecedents històrics del país. Actualment, el territori es troba a la recerca d'una independència energètica a causa de la inestabilitat d'adquisició dels recursos fòssils perquè normalment els recursos són importats des d'altres països.

Les mesures desenvolupades permeten l'obtenció de resultats satisfactoris amb una contribució del 25% de les energies renovables com a font d'energia primària en la matriu energètica mexicana. I s'aconsegueix una disminució d'emissions de carboni d'aproximadament un 13% en comparació amb l'escenari tendencial.

En conclusió, es mostren els resultats de la transició energètica sostenible de Mèxic a través de gràfiques d'Excel on es comparen els indicadors entre l'escenari tendencial (BAU) i l'escenari sostenible. S'afeg també una explicació dels gràfics amb la finalitat d'aconseguir un clar enteniment dels valors mostrats.

Paraules clau: Sostenibilitat, Energies renovables, Escenaris Energètics, Matriu energètica.

ABSTRACT

The objective of this document is the elaboration of a sustainable development plan based on the analysis of the current Mexican energy matrix. The realization of the project can provide a reference of the starting point and a projection of where Mexico could be able to develop in terms of energy, which could also be used as a baseline for decision making on the implementation of future sustainability projects in society.

During the development of the project, the positioning of clean energy in different areas of Mexico is encouraged to ensure compliance with the Sustainable Development Goals described in the 2030 Agenda. Specifically, SDG 7 is fulfilled, providing access to affordable and clean energy.

As a reference point, a study period of 2020-2035 is covered, from which a baseline scenario (BAU) is made to visualize the energy scenario in Mexico without the application of sustainability measures, comparing it with a sustainability scenario based mostly on the implementation of renewable energies as a source of electricity generation.

From the elaboration of the scenarios it is possible to understand that the country depends closely on fossil fuels (gasoline and natural gas) for its electricity generation, so the implementation of sustainability strategies are essential for the development and energy sovereignty of Mexico.

The projection of the sustainable development scenario is proposed considering the economic, governmental and environmental context of Mexico through the understanding of the country's historical background. Currently, the territory is in search of energy independence due to the instability in the acquisition of fossil resources because the resources are usually imported from other countries.

The measures developed allow satisfactory results to be obtained with a contribution of 25% of renewable energies as a primary energy source in the Mexican energy matrix. And a reduction in carbon emissions of approximately 13% is achieved compared to the trend scenario.

In conclusion, the results of Mexico's sustainable energy transition are shown through Excel graphs comparing the indicators between the BAU scenario and the sustainable scenario. An explanation of the graphs is also added to achieve a clear understanding of the values shown.

Keywords: Sustainability, Renewable Energies, Energy Scenarios, Energy Matrix.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	2
CAPÍTULO 2. CONTEXTO MÉXICO.....	4
2.1 MÉXICO.....	4
2.2 SOCIO-POLÍTICO	5
2.3 ECONÓMICO.....	6
2.4 ENERGÉTICO	7
2.4.1 RECURSOS ENERGÉTICOS.....	10
2.4.1.1 HÍDRICO.....	10
2.4.1.2 SOLAR	12
2.4.1.3 EÓLICO.....	13
2.4.1.4 BIOMASA.....	14
2.4.1.5 GEOTERMIA.....	15
2.4.1.6 NUCLEAR	16
2.4.1.7 PETRÓLEO.....	17
2.4.1.8 CARBÓN.....	18
2.5 CONCLUSIÓN SOBRE MÉXICO	19
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	20
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	20
3.2 DATOS DE ENTRADA.....	22
3.3 RITMOS DE CRECIMIENTO.....	25
3.4 ESCENARIOS ENERGÉTICOS.....	28
3.4.1 ESCENARIO TENDENCIAL.....	29
3.4.2 ESCENARIO SOSTENIBLE.....	29
3.5 INDICADORES	30

3.5.1	RESUMEN INDICADORES	31
CAPÍTULO 4. ESCENARIO TENDENCIAL (BAU) DE MÉXICO		32
4.1	DESCRIPCIÓN	32
4.2	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	34
4.3	MEDIDAS A IMPLEMENTAR.....	34
4.4	MÉTODO DE CÁLCULO (EXCEL)	34
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
4.5.1	FUENTES DE ENERGÍA	41
4.5.2	SECTORES DE ACTIVIDAD	42
4.6	CONCLUSIONES BAU	43
CAPÍTULO 5. ESCENARIO SOSTENIBLE.....		44
5.1	DESCRIPCIÓN	44
5.2	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	44
5.3	MEDIDAS A IMPLEMENTAR.....	45
5.3.1	Medida 1: Incremento de la energía hidroeléctrica	45
5.3.2	Medida 2: Incremento de la energía fotovoltaica.....	54
5.3.3	Medida 3: Incremento de Energía Eólica	63
5.3.4	Medida 4: Incremento de la Energía Nuclear.	71
5.3.5	Medida 5: Retiro progresivo de centrales carboeléctricas.	75
5.3.6	Medida 6: Transición hacia la movilidad eléctrica	79
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	84
5.4.1	FUENTES DE ENERGÍA	88
5.4.2	SECTORES DE ACTIVIDAD	89
5.5	CONCLUSIONES SOST	90
CAPÍTULO 6. COMPARATIVA BAU VS. SOSTENIBLE.....		92
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		97
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....		99
CAPÍTULO 9. ANEXOS		105
9.1	MÉTODO DE CÁLCULO (EXCEL)	105
9.2	PRESUPUESTO	112
9.2.1	ACTIVIDADES PRINCIPALES	112
9.2.2	ACTIVIDADES SECUNDARIAS	112
9.2.3	EQUIPOS Y OTROS SERVICIOS	112

9.2.4	COSTOS DEL TRABAJO ACADÉMICO	113
9.2.5	PRESUPUESTO TOTAL DEL TRABAJO ACADEMICO	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Principales Centrales Eléctricas de la CFEy PIE, al 31 de Diciembre del 2020. Fuente: (Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), 2020)	8
Figura 2:	Principales Centrales Eléctricas privadas, al 31 de diciembre 2020. Fuente: (Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), 2020)	9
Figura 3:	Consumo de Energía primaria por Fuente de Energía en México 2020. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022).....	9
Figura 4:	Generación de Electricidad por Fuente de Energía en México 2020. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022).....	9
Figura 5:	Capacidad y generación en Centrales hidroeléctricas 2016 y mapa de disponibilidad hídrica. Fuente: (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, 2017).....	11
Figura 6:	Irradiación horizontal global de México (kWh/m ²). Fuente: (Global solar atlas, 2024)	13
Figura 7:	Potencial del viento en México (m/s). Fuente: (Global Wind Atlas, 2024).....	14
Figura 8:	Uso de suelo y vegetación en México. Fuente: (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 1999)	15
Figura 9:	Potencial geotérmico en México. Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2022) .	16
Figura 10:	Ubicación de la Central Nuclear Laguna Verde en México. Fuente: Elaboración propia	17
Figura 11:	Potencial de hidrocarburos en México. Fuente: (Potencia natural, 2008)	17
Figura 12:	Zonas potenciales de Carbón en México. Fuente: (Servicio Geológico Mexicano, 2017)	18
Figura 13:	Metodología para la elaboración del trabajo académico. Fuente: Elaboración propia	21
Figura 14:	Energía primaria en México. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022).....	22
Figura 15:	Evolución del consumo de Energía primaria por cada sector de 1990-2020. Fuente: Elaboración propia con datos del (International Energy Agency, 2022).....	26
Figura 16:	Resultados del Escenario BAU 2020 en México. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	32
Figura 17:	Ejemplo de la aplicación de los ritmos de crecimiento en el 2023. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	35

Figura 18: Consumos energéticos (ktep y %) de México en el año 2023. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	35
Figura 19: Energía importada y exportada en México (ktep) en 2020. Fuente: (International Energy Agency, 2022).....	36
Figura 20: Contribución de Energía nuclear en México 2020. Fuente: (International Energy Agency, 2022).....	37
Figura 21: Evolución de los Indicadores ambientales en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia	37
Figura 22: Evolución del indicador de Emisiones de CO ₂ en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia	38
Figura 23: Evolución de los Indicadores socio-económicos en el escenario BAU en el período 2020-2035. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 24: Evolución de los Indicadores Energéticos en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia	40
Figura 25: Evolución del indicador de contribución de las Energías Renovables (%) como fuente de Energía primaria en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia	40
Figura 26: Evolución de la contribución de cada recurso en la generación eléctrica en México en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 27: Evolución del indicador de emisiones de carbono proveniente de cada sector en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia	42
Figura 28: Línea del tiempo del desarrollo de la Energía hidroeléctrica del 2020-2035. Fuente: Elaboración propia	45
Figura 29: Documentos de Licitación de las mejoras en las plantas hidroeléctricas. Fuente: (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2022)	46
Figura 30: Infraestructura actual de la Central Chicoasen II. Fuente: (Anónimo, 2023).....	48
Figura 31: Ubicación de la Central Chicoasen II. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 32: Ubicación Minicentral Hidroeléctrica Amata. Fuente: Elaboración propia	48
Figura 33: Ubicación de la Minicentral Hidroeléctrica Presa Picachos. Fuente: Elaboración propia	49
Figura 34: Infraestructura física de la Presa Santa María. Fuente: (Gobierno de México, 2023)49	
Figura 35: Ubicación de la Minicentral Hidroeléctrica Presa Santa María. Fuente: Elaboración propia	49
Figura 36: Ubicación propuesta para la Planta hidroeléctrica Río de los Pescados. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 37: Expansión de la Energía Hidroeléctrica en México 2020-2035. Fuente: Elaboración propia	54

Figura 38: Línea del tiempo del desarrollo de la Energía Fotovoltaica del 2020-2035. Fuente: Elaboración propia	55
Figura 39: Sol de insurgentes en Baja California. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 40: La Toba Baja California. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 41: Puerto Peñasco Sonora. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 42: Calera Zacatecas. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 43: Ubicación planta solar flotante en la presa Miguel de la Madrid. Fuente: Elaboración propia	61
Figura 44: Ubicación planta solar flotante en el Lago de Chapala. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 45: Expansión de la Energía Fotovoltaica en México 2020-2035. Fuente: Elaboración propia	62
Figura 46: Línea del tiempo del desarrollo de la Energía Eólica del 2020-2035. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 47: Parque eólico Fenicias. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 48: Parque eólico Dolores. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 49: Ubicación propuesta para el parque eólico Marengo I, Campeche. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 50: Ubicación propuesta para los parques eólicos Amistad 5, 6 y 7, Coahuila. Fuente: Elaboración propia	66
Figura 51: Ubicación propuesta para el parque eólico Carabina II, Coahuila. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 52: Ubicación propuesta para el parque eólico Santa Catarina, Nuevo León. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 53: Ubicación propuesta para el parque eólico Sureste VI, VIII, VIII y IX, Oaxaca. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 54: Ubicación propuesta para el parque eólico Ventika III y IV, Nuevo León. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 55: Ubicación propuesta para el parque eólico Marino Yucatán I y II. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 56: Ubicación propuesta para el parque eólico Marino Tehuantepec I y II. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 57: Expansión de la Energía Eólica en México 2020-2035. Fuente: Elaboración propia..	71
Figura 58: Línea del tiempo del desarrollo de la Energía Nuclear del 2020-2035. Fuente: Elaboración propia	72
Figura 59: Planta nuclear Laguna Verde, Veracruz. Fuente: Elaboración propia.....	73

Figura 60: Ubicación propuesta para planta nuclear en Nuevo León. Fuente: Elaboración propia	73
Figura 61: Expansión de la Energía Nuclear en México 2020-2035. Fuente: Elaboración propia	75
Figura 62: Centrales carboeléctricas José López Portillo. Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 63: Centrales carboeléctricas Plutarco Elías Calles. Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 64: Evolución indicadores ambientales. Fuente: Elaboración propia	85
Figura 65: Evolución de indicador ambiental: Emisiones CO ₂ . Fuente: Elaboración propia	86
Figura 66: Evolución indicadores socio-económicos. Fuente: Elaboración propia	86
Figura 67: Evolución indicadores energéticos. Fuente: Elaboración propia	87
Figura 68: Evolución del indicador Energías renovables. Fuente: Elaboración propia	88
Figura 69: Fuente energéticas para generación de electricidad. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	88
Figura 70: Emisiones de carbono por sector de actividad. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	89
Figura 71: Demanda energía primaria (ktep), escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	92
Figura 72: Demanda energía primaria (ktep), escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023).....	92
Figura 73: Demanda energía primaria (%), escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	92
Figura 74: Demanda energía primaria (%), escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	92
Figura 75: Generación de electricidad, escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	93
Figura 76: Generación de electricidad, escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	93
Figura 77: Evolución indicadores socioeconómicos, escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023).....	94
Figura 78: Evolución indicadores socioeconómicos, escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	94
Figura 79: Emisiones (kt) por sectores, escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	95
Figura 80: Emisiones (kt) por sectores, escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	95
Figura 81: Contribución por sectores en el 2020. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	105

Figura 82: Contribución por sectores en el 2021. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	106
Figura 83: Contribución por sectores en el 2023. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	106
Figura 84: Contribución por sectores en el 2025. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	107
Figura 85: Contribución por sectores en el 2027. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	108
Figura 86: Contribución por sectores en el 2030. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	109
Figura 87: Contribución por sectores en el 2032. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	110
Figura 88: Contribución por sectores en el 2035. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Consumo energético (ktep) proveniente de cada sector en México. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022).....	23
Tabla 2: Datos de crecimiento poblacional y el Producto Interno Bruto en México. Fuente: Elaboración propia con datos del (Banco Mundial, 2023)	24
Tabla 3: Factores de emisiones de CO ² por cada sector. Fuente: (Foro Nuclear, 2023).....	25
Tabla 4: Ritmos de crecimiento para cada sector de México. Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 5: Indicadores para el trabajo académico. Fuente: Elaboración propia.....	31
Tabla 6: Plantas hidroeléctricas para puesta en marcha en el 2025. Fuente: Elaboración propia	47
Tabla 7: Propuestas para el aumento de potencia instalada en plantas hidroeléctricas para el 2027. Fuente: Elaboración propia	50
Tabla 8: Propuesta de aumento de la capacidad de plantas hidroeléctricas existentes. Fuente: Elaboración propia	52
Tabla 9: Medidas propuestas para mejora de la energía hidroeléctrica en México. Fuente: Elaboración propia	53
Tabla 10: Coeficientes de producción anual (kWh). Fuente: Elaboración propia con datos de (PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, 2022)	56
Tabla 11: Proyección de la Energía Fotovoltaica 2023-2025. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 12: Proyección de la Energía Fotovoltaica 2027-2035. Fuente: Elaboración propia.....	58

Tabla 13: Proyección de la Energía Fotovoltaica flotante 2030-2035. Fuente: Elaboración propia	60
Tabla 14: Implementación de Energía fotovoltaica total en México. Fuente: Elaboración propia	62
Tabla 15: Factores de Plantas eólicas México. Fuente: Elaboración propia con datos de (E. C. , 2006)	63
Tabla 16: Proyección de la Energía Eólica 2023-2025. Fuente: Elaboración propia	64
Tabla 17: Proyección de la Energía Eólica 2027. Fuente: Elaboración propia	65
Tabla 18: Proyección de la Energía Eólica 2030. Fuente: Elaboración propia	66
Tabla 19: Proyección de la Energía Eólica 2032-2035. Fuente: Elaboración propia	67
Tabla 20: Proyección de la Energía Eólica Marina. Fuente: Elaboración propia	69
Tabla 21: Implementación de Energía Eólica total en México. Fuente: Elaboración propia	71
Tabla 22: Implementación de Energía Nuclear total en México. Fuente: Elaboración propia ...	74
Tabla 23: Implementación de la medida de retiro de centrales carboeléctricas. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022).....	76
Tabla 24: Potencia instalada proveniente de fuentes renovables 2025-2030. Fuente: Elaboración propia	77
Tabla 25: Origen renovable de la Energía sustituida del carbón. Fuente: Elaboración propia ...	78
Tabla 26: Datos para los cálculos de emisiones por vehículo. Fuente: Elaboración propia	80
Tabla 27: Proyección de sustitución gradual de autos de combustibles fósiles por autos eléctricos 2023-2035. Fuente: Elaboración propia.....	81
Tabla 28: Potencia instalada proveniente de fuentes renovables 2023-2035. Fuente: Elaboración propia	82
Tabla 29: Potencia instalada disponible de fuentes renovables 2023-2035. Fuente: Elaboración propia	82
Tabla 30: Origen renovable de la Energía sustituida del combustible fósil. Fuente: Elaboración propia	83
Tabla 31: Resumen de los resultados de sostenibilidad obtenidos. Fuente: Elaboración propia.	95
Tabla 32: Evaluación de las medidas de sostenibilidad aplicadas en ktep. Fuente: Elaboración propia	105
Tabla 33: Costos asociados a las actividades principales, secundarias y servicios. Fuente: Elaboración propia	113
Tabla 34: Costos asociados al equipo y programas. Fuente: Elaboración propia	113
Tabla 35: Resumen del presupuesto total del proyecto. Fuente: Elaboración propia	114

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Existen diversos factores que han ocasionado el aumento de la demanda energética en el mundo, entre ellos el crecimiento demográfico.

Actualmente, la población mundial es de aproximadamente 8 mil millones de personas y se prevé un alcance de hasta 9,7 mil millones para el año 2050 esto de acuerdo con la información presentada por la Organización de las Naciones Unidas. (Noticias ONU, 2019)

Los seres humanos consumen una gran cantidad de energía y si el crecimiento persiste de manera exponencial, por consecuencia el gobierno se encuentra comprometido a satisfacer la demanda energética necesaria para el desarrollo de las comunidades.

Ante esta situación, se conoce que los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) tienen un papel fundamental para la industria energética debido a que representan al recurso más utilizado para la generación eléctrica pero asimismo representan afectaciones negativas en el medio ambiente ocasionando el calentamiento global.

Por lo tanto, se han desarrollado innovadoras formas de generación eléctrica para que tengan un menor impacto en el medio ambiente y al mismo tiempo reducir los costos de producción. Esto origina la idea de las energías renovables o también conocidas como energías limpias, las cuales permiten aprovechar los recursos naturales de la tierra de manera sostenible. Entre este tipo de energías se pueden mencionar las de mayor desarrollo en el mundo, entre ellas: la energía solar (radiación del sol), la energía hidráulica (fuerza de las corrientes de agua) y la energía eólica (fuerza del viento).

México es un país con un gran potencial para la producción de energías renovables debido a su ubicación geográfica, pero a pesar de eso su matriz energética se encuentra dominada en aproximadamente un 80% por energías no renovables.

Uno de los objetivos del territorio mexicano es conseguir una soberanía energética, por lo tanto, la implementación de proyectos de energías limpias representa una oportunidad para cumplir con los objetivos deseados. En este sentido, se puede enfatizar que hasta el día de hoy cuenta con 101 presas de generación eléctrica (energía hidráulica), 70 parques eólicos y 63 centrales fotovoltaicas (energía solar).

Y a pesar de que los números parecen alentadores se requiere un mayor esfuerzo para poder mejorar la matriz energética por medio de una mayor promoción de las energías renovables en el país, ya que hasta el momento solo cubren un 12% de la demanda energética primaria. Para esto, se plantean algunas medidas que podrían favorecer su independencia energética y al mismo tiempo disminuir las emisiones de carbono, como son: la modernización de las centrales hidráulicas, la transición hacia la electromovilidad, instalación de plantas eólicas y fotovoltaicas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la matriz energética mexicana con el fin de proponer medidas de sostenibilidad que sean capaces de proyectar un camino hacia la transición energética de México por medio de la promoción de energías renovables en el territorio.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un análisis de los recursos energéticos de México, entre los cuales se encuentran el recurso eólico, hídrico, solar, nuclear, petróleo, carbón, geotermia y biomasa.
- Realizar un escenario sostenible durante el horizonte 2020-2035, en donde se proyecte un futuro hacia la implementación del 25% de energías renovables y reducir un 13% las emisiones de carbono en comparación con el escenario tendencial.
- Diseñar un plan de acción para generar el 40% de electricidad a partir de la implementación de energías renovables (eólica, hidroeléctrica y solar) durante el periodo de análisis.
- Disminuir del 86% a un 72% la dependencia exterior para promover la soberanía energética nacional a través del aumento de la generación eléctrica derivado del desarrollo de energías limpias.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El análisis de la matriz energética de México se realiza durante el periodo 2020-2035 porque de acuerdo con información presentada por la SENER (Secretaría Nacional de Energía) será cuando el territorio mexicano presente un cambio significativo en la matriz energética por la posible asequibilidad de las innovaciones en el ámbito energético. (Secretaría de Energía, 2019)

El período de análisis es a partir del 2020 debido a la falta de actualización de la información por parte de la Agencia Internacional de Energía, aparte se considera que el consumo energético del año 2021 es distinto a lo normal debido a la pandemia de COVID.

La problemática energética inicial del país es su fuerte dependencia de los recursos fósiles, ya que el 80% de su generación eléctrica proviene del petróleo, gas natural y del carbón, que son las principales fuentes de emisiones de carbono. Además, se considera que, en materia de política energética, el país se encuentra apostando firmemente hacia la continua utilización de los recursos fósiles para satisfacer la demanda energética de los ciudadanos.

Por lo que este informe busca estudiar el escenario energético de México para desarrollar un plan que permita determinar las mejores alternativas del país para poder encaminarse hacia un futuro más sostenible para los mexicanos.

Esto hace referencia a la promoción del desarrollo de energías limpias para generar un 40% de electricidad en México con energías limpias, de manera que se priorice la utilización sostenible y racional de los recursos energéticos con el propósito de lograr la independencia energética y al mismo tiempo reducir la huella de carbono.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento consta de un total de nueve capítulos que se describen a continuación. Para empezar, el primer capítulo explica como la matriz energética mexicana depende fuertemente de los recursos fósiles para cubrir la demanda energética.

Para el segundo capítulo se detalla el contexto de México que permite obtener una comprensión de la situación general, económica, energética y socio-política del país para poder evaluar la viabilidad del desarrollo de medidas de sostenibilidad. Además, se analiza detalladamente los diferentes recursos energéticos disponibles en el territorio para poder determinar la situación energética actual.

El tercer capítulo hace referencia a la metodología, es decir, el procedimiento utilizado para poder llevar a cabo el objetivo de como analizar la matriz energética de México. Asimismo, se explica detalladamente las unidades de medida utilizadas y sus respectivos factores de conversión.

El cuarto capítulo hace referencia al Escenario tendencial (BAU), es la sección donde se analiza la situación actual de México respecto a la matriz energética.

Seguidamente, el quinto capítulo constituye la realización del escenario sostenible a partir de medidas de sostenibilidad implementadas en la matriz energética de México.

El sexto capítulo: Comparativa BAU vs Sostenible muestra una serie de gráficos que buscan representar las diferencias de los indicadores, entre el escenario tendencial y el escenario después de la implementación de las medidas de sostenibilidad.

En el capítulo séptimo se redactan las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de los indicadores generados con la comparación entre ambos posibles escenarios.

El capítulo octavo muestra las fuentes bibliográficas utilizadas durante la realización del trabajo académico y que asimismo hacen posible la adquisición de datos confiables. Y para finalizar, el capítulo noveno, se comprende de anexos, es decir, información necesaria para el método de cálculo aplicado en la hoja de cálculo y el presupuesto del total del trabajo académico.

CAPÍTULO 2. CONTEXTO MÉXICO

2.1 MÉXICO

Estados Unidos Mexicanos se encuentra ubicado en la parte meridional de América del norte, con una extensión territorial de 1.964.375 km² limitado al sureste con Guatemala y Belice, al norte con Estados Unidos, al oriente con el Golfo de México y el Mar Caribe, y al poniente con el Océano Pacífico. Debido a su extensa superficie terrestre, es el decimotercer país más grande del mundo y el tercero más extenso de América latina.

México se ha convertido en una de las diez naciones más pobladas del mundo. Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se estima una población de ciento veintiséis millones de personas en el 2020 con una media de esperanza de vida de 75,5 años. (INEGI, 2020)

Por otro lado, el territorio mexicano es una república representativa y democrática integrada por 32 entidades federales (31 estados y la Ciudad de México). Su forma de gobierno consiste en un gobierno federal y gobiernos estatales que están integrados por los poderes Ejecutivo, Legislativo y Judicial. (Secretaría de Relaciones Exteriores, 2013)

Respecto al clima, se puede mencionar que presenta diversas variaciones dependiendo de la región debido a la extensión de su territorio. La ubicación del trópico de cáncer tiene un papel fundamental al establecer la marca de transición entre el clima húmedo y semihúmedo de la parte sur del país, y entre el clima árido y semi-árido para la zona norte. (De Alba E. y Reyes M.)

La economía de México está basada en un mercado de exportaciones, especialmente de bienes manufacturados (coches, piezas, accesorios, etc.). México depende considerablemente de sus relaciones comerciales con su principal socio comercial, Estados Unidos, que representa más de tres cuartas partes de las exportaciones del país. Otros destinos para las exportaciones de México son Canadá, China, Alemania y Japón. En cuanto a las importaciones, los principales orígenes son Estados Unidos, China, Corea del Sur, Alemania y Japón. México ha firmado una docena de acuerdos de libre comercio con unos cuarenta países diferentes del mundo.

Otras ventajas comerciales de México son el Acuerdo Estados Unidos-México-Canadá (que sustituyó al TLCAN en 2020), su acuerdo de libre comercio con la Unión Europea desde 2000, un acuerdo comercial con Japón desde 2005 y la fundación en 2012 de la Alianza del Pacífico junto con Colombia, Chile y Perú. (Banco Santander, 2023)

De acuerdo con la información presentada se puede entender como México tiene diversos acuerdos de cooperación económica y es una de las razones por las cuales su economía se encuentra en vías de desarrollo. Según los datos del Banco Mundial la economía de México es la decimocuarta más grande del mundo con un PIB (US \$) de 1,47 billones en el año 2022.

México se posicionó como el onceavo país con mayores emisiones de gases de efecto invernadero en el 2022 resultando en un 1,4 % del total de las emisiones del mundo. (Statista, 2023).

El territorio mexicano se encuentra actualmente en el contexto del compromiso con la comunidad internacional para apoyar con el cambio climático. Por esa razón, es que el país ha firmado los acuerdos internacionales como: el Acuerdo de París y la Agenda 2030.

El famoso tratado internacional, llamado Acuerdo de París, fue alcanzado en 2015 y fue adoptado por 195 partes para limitar el calentamiento global muy por debajo de los 2 grados Celsius en comparación con los niveles preindustriales. (United Nations Treaty Collection, 2015)

A su vez, la Agenda 2030 se compone por sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que establecen un plan de acción diseñado para beneficiar a las personas, el planeta y la prosperidad.

Por medio de la realización de estos acuerdos se ha determinado que para el año 2030 México reducirá un 22% las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a una línea base. Estas metas fueron incluidas en la reforma a la Ley General de Cambio Climático del 13 de julio de 2018. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

Para lograr los compromisos internacionales, es necesario el uso de tecnologías y la aplicación de políticas apropiadas para aquellos sectores que generan un mayor volumen de emisiones, como es el caso de la producción de energía eléctrica, que contribuye al 20% del total de emisiones nacional. (C., 2023)

El ranqueo Energy Transition Index (ETI), del Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés), destacó que México cayó al puesto 68 (después de estar en el 46 en el 2021). Ello debido a que tiene un cumplimiento de 54,1% de las metas establecidas por el organismo, que desarrolló un indicador global de participación de las naciones en el combate al cambio climático y logros en la descarbonización y cuidado del planeta mediante acciones en el sector energético. (Solucion Mexico, 2023).

La importancia de la sostenibilidad internacional y nacional ayuda en el establecimiento del objetivo planteado del presente trabajo. Por este motivo, se establece como objetivo la reducción de emisiones de CO₂ de un 13% respecto al nivel tendencial.

2.2 SOCIO-POLÍTICO

Los Estados Unidos Mexicanos tienen un gobierno republicano, representativo, democrático laico y federal, dividido en los tres poderes de la unión (poder Ejecutivo, Legislativo y Judicial). La separación de poderes garantiza el correcto ejercicio de sus funciones, con el propósito de respetar el Estado de Derecho y evitar la concentración de poder en una sola persona.

México tiene un sistema multipartidista logrando los partidos políticos sean el principal ente de contribución ciudadana para promover la participación de la sociedad en la vida democrática.

En la actualidad México mantiene una situación sociopolítica de diversos cambios ocasionados justamente por su estructura multipartidista en la administración federal. En este sentido, se han priorizado la solución de los problemas para poder darle cumplimiento a los objetivos planteados respecto al sector energético. Sin embargo, las directrices de políticas energéticas

que se están siguiendo carecen de validez por parte de los organismos internacionales en el marco del desarrollo sostenible, entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

- Promoción del gas natural: El gas natural se ha promovido intensamente como sustituto de otras fuentes de energía en todos los sectores de consumo, especialmente en la generación de electricidad, en razón de su supuesto bajo costo, menor impacto ambiental, así como mayor versatilidad y elevada eficiencia en su uso. (Sheinbaum C., 2009)
- Promoción de las energías convencionales por medio del fortalecimiento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE): En el 2013 se aprobó la llamada Reforma energética donde se planteaba la desintegración de la empresa gubernamental para pasar a los mercados abiertos, es decir, el desenvolvimiento del sector privado. Sin embargo, con el cambio de gobierno en el 2018 se modifica esta ley. El plan de negocios actual determina que la CFE tiene un 54% de participación de la generación eléctrica y el 46% restante de la iniciativa privada con el fin de mantener el bienestar de los mexicanos respecto al costo de la energía eléctrica. Esto ha generado una inestabilidad por parte de las inversiones de carácter privado, resultando en una desaceleración del desarrollo de las energías limpias en el país.
- Promoción del petróleo: La administración del gobierno federal a través de la empresa PEMEX (Petróleos mexicanos) realizan inversiones para el desarrollo y crecimiento de los petrolíferos en México. Durante el sexenio de López Obrador (2018-2024) la empresa PEMEX adquiere la refinería Deer Park localizada en Texas con el fin de mejorar la seguridad energética en el país.

Además, se ha dado cavidad hacia una mayor dependencia de este recurso fósil por medio de las existentes campañas de rehabilitación de las seis refinerías mexicanas (Minatitlán, Cadereyta, Madero, Salamanca, Salina Cruz y Tula) con el propósito de satisfacer la creciente demanda del petrolífero.

Es un hecho que el cambio climático es un reto global, que además exige respuesta inmediata y decidida por todas las naciones, para enfrentar y contener sus efectos. México debe asumir este compromiso y responsabilidad global; ante este desafío, es fundamental que tenga la sostenibilidad como objetivo en sus planes de desarrollo, pero además que se dé rendición de cuentas al respecto, impulsando un crecimiento democrático, sostenido y sustentable de la nación, acompañándose de modelos de gestión, que incorpore principios en la rendición de cuentas, políticas públicas y acceso a información, logrando la participación ciudadana para enfrentar requerimientos de hoy y del futuro. (K., 2021)

México hasta ahora ha impulsado la reorientación amigable con el clima en su sector energético por medio de la reforma energética y la Ley de Transición Energética. Sin embargo, el sector energético mexicano sigue contemplando la utilización alta de carbono, donde se plantean metas convencionales e inalcanzables en el ámbito del desarrollo sustentable.

La política energética nacional necesita encaminarse hacia la creciente participación de las fuentes de energías renovables para poder disminuir las emisiones de carbono del país y al mismo tiempo lograr una seguridad energética en el país. (Sheinbaum C., 2009)

2.3 ECONÓMICO

Con una población de casi 130 millones, una rica historia cultural y gran diversidad, una geografía favorable y abundantes recursos naturales, México se encuentra entre las quince economías

más grandes del mundo y es la segunda de América Latina. El país tiene instituciones macroeconómicas sólidas, está abierto al comercio y tiene una base manufacturera diversificada conectada a cadenas de valor globales.

Durante las últimas tres décadas ha tenido un desempeño debajo de lo esperado en términos de crecimiento, inclusión y reducción de la pobreza en comparación con países similares. La economía tuvo un crecimiento estimado en poco más del 2,0 % anual entre 1980 y 2022.

La economía mexicana creció 3,1% en 2022, tras un repunte de 4,7% en 2021 después de una caída de 8,0% en 2020 debido a la pandemia de COVID-19. La economía ha recuperado los niveles de empleo y de Producto Interno Bruto (PIB) previos a la pandemia. El marco macroeconómico estable de México, el dinamismo de Estados Unidos y la sólida base manufacturera respaldarán el crecimiento económico. (Banco Mundial, 2023)

Desde el punto de vista económico, la crisis energética afecta en diferentes ámbitos de la economía mexicana. Uno de los factores que han afectado es, la gran dependencia externa de hidrocarburos primarios y transformados, convirtiéndose en el principal destinatario de las exportaciones estadounidenses de gas natural, diésel y gasolinas.

Otro factor es sin duda la decadencia del sector energético respecto a su infraestructura, la cual necesita ser modificada para poder satisfacer la demanda de la población. Esto se puede traducir en la implementación de redes inteligentes y de generación distribuida.

Superar la crisis energética requiere transitar del sistema actual hacia otro que garantice conciliar objetivos nacionales de seguridad, igualdad y sostenibilidad, en materia de energía. Se requiere para ello reducir el desperdicio y la intensidad energética en la producción y el consumo de la economía (eficiencia energética); diversificar las fuentes de energía con la mayor prioridad a las renovables y al uso racional e integrado de los recursos naturales (transformación productiva); y reorganizar las instituciones del Estado con el propósito de identificar, financiar y ejecutar proyectos prioritarios de inversión pública y privada en las industrias petrolera y eléctrica y en las actividades consumidoras de energía. (R., 2020)

En plena crisis energética, la economía mexicana ha demostrado estabilidad y solidez. El peso mexicano se ha posicionado como la cuarta moneda emergente, junto al rublo, que más fortaleza ha mostrado frente al dólar durante el último año. (Liñan, 2023)

Las energías renovables representan un sinfín de oportunidades para invertir y desarrollar en México, debido a que el país cuenta con una ubicación privilegiada es posible lograr un desarrollo sostenible en la sociedad, disminuir el consumo de recursos fósiles y propiciar la soberanía energética.

2.4 ENERGÉTICO

El tema energético ha sido parte fundamental en el debate sobre el desarrollo sustentable. La disponibilidad de recursos energéticos es indispensable para resolver la pobreza y mejorar las condiciones de vida, es clave en la economía de las naciones, pero la producción y el uso de los recursos energéticos constituyen actividades que generan la mayor parte de los impactos ambientales locales y globales. (Sheinbaum C., 2009)

El mundo actual se encuentra enfrentando diversas adversidades, entre las que se puede mencionar la reciente pandemia COVID, la guerra Ucrania-Rusia, Israel-Gaza por lo que los países

han tenido que desarrollar cambios respecto a la importancia de la transición energética con el fin de lograr una seguridad energética y al mismo tiempo conseguir una independencia de los energéticos provenientes de países extranjeros.

En México la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es una empresa propia del gobierno federal, la cual se encarga de todo el proceso de generación de energía eléctrica en el territorio mexicano. Comenzando desde la generación de energía, transmisión, distribución y hasta que finaliza con el consumo de este mismo. (Comisión Federal de Electricidad, s.f.)

El contexto energético de México ha sido complicado durante los últimos periodos derivado mayormente por los cambios políticos ocurridos. A partir de un ejercicio de planeación de la matriz energética nacional por parte de la SENER se puede entender que México presenta un consumo energético primordialmente basado en los combustibles fósiles en todos los sectores.

En la actualidad, el Gobierno mexicano tiene una apuesta importante por el fortalecimiento de la industria petrolera nacional, pero también busca impulsar una política energética que posibilite una transición hacia las energías limpias. Dicha política tiene como principal objetivo que las empresas productivas del Estado tengan una amplia participación en la administración de las energías limpias, para evitar que la soberanía económica del país se vea comprometida ante el mercado extranjero, por el momento principalmente en materia eléctrica. (Gobierno de México, 2022)

El Centro de Control de Energía (CENACE) muestra la Figura 1 como una representación de las centrales eléctricas de la CFE y los productores independientes de energía hasta el 2020 en todo el territorio de México.

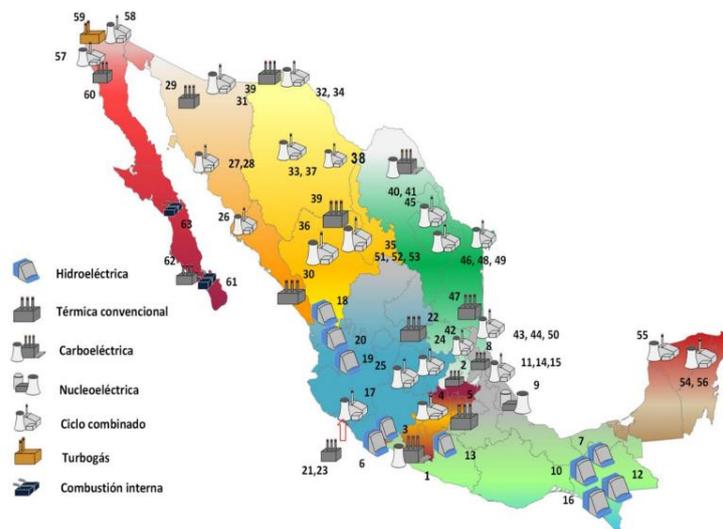


Figura 1: Principales Centrales Eléctricas de la CFE y PIE, al 31 de Diciembre del 2020. Fuente: (Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), 2020)

Adicionalmente, la Figura 2 presenta las principales centrales eléctricas privadas del país hasta el 2020.

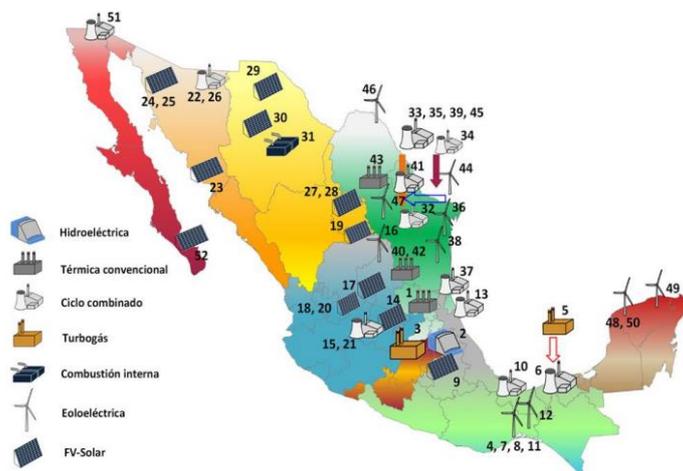


Figura 2: Principales Centrales Eléctricas privadas, al 31 de diciembre 2020. Fuente: (Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), 2020)

A partir de las figuras presentadas se puede concluir como la CFE ha basado su desarrollo mayormente con energías provenientes de recursos fósiles. A diferencia de las empresas privadas, que se puede observar cómo su inversión ha fomentado en gran medida el uso de las energías renovables en México.

En el contexto de la matriz energética de México, se presentan gráficas realizadas a partir de los datos de la Agencia Internacional de Energía para el año 2020 haciendo referencia del consumo de energía primaria en México y su contexto de generación de electricidad México. (International Energy Agency, 2022).

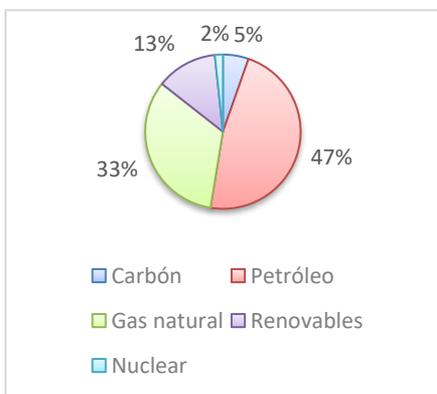


Figura 3: Consumo de Energía primaria por Fuente de Energía en México 2020. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022)

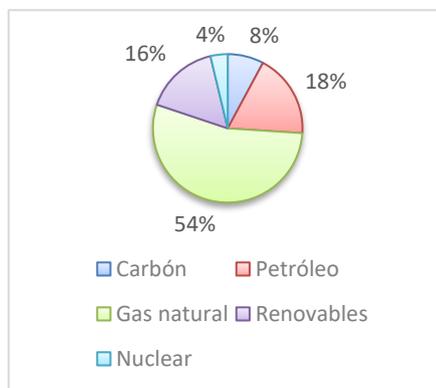


Figura 4: Generación de Electricidad por Fuente de Energía en México 2020. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022)

En la Figura 3 se puede observar el consumo de energía primaria por fuente de energía, en este caso el 47% proviene por parte del petróleo, seguido del consumo de gas natural con un 33%, de las energías limpias se tiene un 13%, seguido del 5% por parte del carbón y finalizando con la contribución del 2% de la energía nuclear.

La Figura 4 muestra la generación de electricidad en México por fuente de energía durante el período 2020, donde el 54% de la electricidad proviene del gas natural derivado de las plantas

de ciclo combinado en su gran mayoría, continuando con el 18% originado del petróleo. Las energías renovables tienen un aporte del 16%, el carbón un 8% y el 4% de energía nuclear.

De manera generalizada se puede ver como la matriz energética de México está dominada por el recurso fósil (petróleo, gas natural, carbón) tanto en la parte de energía primaria y la de generación eléctrica.

La contribución del petróleo es mayor en la gráfica del consumo de energía primaria esto derivado del consumo del sector transporte, es por esta razón que existen diversas propuestas para incentivar la electromovilidad con el fin de reducir el consumo del petróleo en este sentido.

México registra un incremento del consumo de gas natural debido a la sustitución de sus plantas de generación eléctrica actuales las cuales utilizaban petróleo y que han sido modificadas para el ahora uso de gas. Esto con el propósito de disminuir los costos, pero al mismo tiempo eficientar el sistema de generación eléctrica del país.

2.4.1 RECURSOS ENERGÉTICOS

El sector energético mexicano se caracteriza por su dependencia hacia las fuentes energéticas de origen no renovable. En este sentido se puede mencionar que las fuentes de energía se encargan de producir energía de manera directa o a través de alguna transformación y se dividen en: primarias y secundarias.

Las fuentes de energías primarias son energías contenidas en la naturaleza previo a su transformación. Se clasifican en energías no renovables y las renovables. Las primeras hacen referencia a la energía obtenida por combustibles fósiles y por lo tanto sus reservas son limitadas. Las energías renovables o también conocidas como energías limpias son provenientes de recursos naturales y considerados inagotables como pueden ser el sol, agua o el viento.

Para la generación de energía primaria de México se consideran los siguientes recursos: carbón mineral, petróleo, condensados, gas natural, nucleenergía, hidroenergía, geoenergía, energía eólica, energía solar, bioenergía. Este tipo de energía (primaria) es primordial para la obtención de productos secundarios.

La fuente de energía secundaria, como su nombre lo indica, se puede entender como un derivado de las fuentes de energía primarias debido a que se obtienen a partir de la transformación de las primarias con propiedades específicas para el consumo final. En este sentido, se pueden mencionar las siguientes: carbón, coque de petróleo, gas licuado de petróleo (gas LP), gasolinas, naftas, querosenos, diésel, combustóleo, gasóleo, gas seco, etano, electricidad, gases industriales derivados del carbón y productos no energéticos (asfalto, parafinas, lubricantes, propano-propileno y butano-butileno). (Secretaría de Energía, 2021)

A partir de la información previamente mencionada se detallará a profundidad sobre los recursos presentes en el territorio mexicano con el propósito de evaluar su aprovechamiento.

2.4.1.1 HÍDRICO

El recurso hídrico como medio de generación eléctrica comienza a detonarse a partir del año 1938 que fue cuando inició la primera construcción de una planta hidroeléctrica en México. El proyecto de la central "Ixtapatongo" se localiza en Valle de Bravo, Estado de México. Durante su construcción sucedieron eventos desafortunados como la escasez económica y el periodo de la Segunda Guerra Mundial, lo que ocasionó conflictos para la obtención de los equipos y

El primer esquema, se refiere al equipamiento de instalaciones no concebidas originalmente para la generación de energía eléctrica, pero que son susceptibles de llegar a esto, como son las presas de almacenamiento, derivadoras, canales de riego, acueductos, plantas de tratamiento, obras de regulación, etc., respetando las necesidades actuales en los usos del agua, el entorno económico, social y ambiental. De esta manera se dispondría de una cartera de posibles proyectos, donde la componente que se requiere agregar es, sólo la obra hidroeléctrica y la de transmisión eléctrica, lo que redundaría en un costo menor.

El segundo esquema se refiere a aquellas centrales que la vida útil de puede superar los 100 años y es usual contar con equipos con bajas eficiencias de operación, ya sea por su diseño original o por las pérdidas acumuladas durante su vida de servicio, por lo cual se puede trabajar en la modernización de equipos e instalaciones auxiliares que permitan recuperar las eficiencias operativas originales y/o incrementar la capacidad de generación.

El crecimiento de la generación hidroeléctrica en México es una opción interesante porque representa una forma de generar energía limpia con bajos costos de mantenimiento y un amplio ciclo de vida. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, 2017)

2.4.1.2 SOLAR

El recurso solar se ha vuelto cada vez más importante en la economía debido a que a través de la radiación proveniente del sol y con el uso de paneles fotovoltaicos o sistemas de concentración solar se convierte en una fuente de energía primaria para la generación eléctrica.

México presenta una ubicación ventajosa para el aprovechamiento del recurso solar. La manera de medir el potencial de energía solar que un territorio tiene es a través de la radiación solar.

En el año 2014 se inaugura el primer proyecto de energía solar fotovoltaica para generar energía eléctrica, denominado Aura Solar localizado en Baja California Sur por el grupo mexicano Gauss Energía; posteriormente los grupos Iusol, de México, y Eosol Energy, de España, incursionaron en proyectos de pequeña producción con dos y cinco centrales, respectivamente.

Con relación a la generación de electricidad mediante sistemas de concentración solar, se encuentra solamente en operación la central Agua Prieta II con una capacidad 14 MW. Está ubicada en el estado de Sonora, cuenta con una capacidad instalada de 394 MW y es la primera central termosolar híbrida de ciclo combinado (solar-gas) en América Latina en contar con un campo solar integrado que utiliza tecnología parabólica. (ProMéxico, 2017)

Durante el año 2020 la generación fotovoltaica ascendió a 11.360,01 GWh, significando un aporte del 4,29% de la generación neta total en la matriz energética de México. (SENER, 2020)

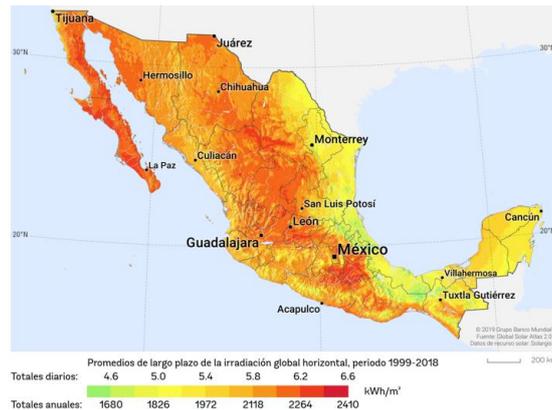


Figura 6: Irradiación horizontal global de México (kWh/m²). Fuente: (Global solar atlas, 2024)

De acuerdo con la Figura 6 se puede observar como la zona norte del país se distingue por su gran potencial de recibir altas radiaciones solares de aproximadamente 6,6 kWh/m² al día, y para la zona centro se puede percibir un índice de radiación solar entre 5,4 kWh/m² al día.

El mapa geográfico de la Figura 6 permite determinar la zona norte como una de las regiones más rentables para la instalación de sistemas fotovoltaicos debido a que recibe la mayor irradiación del país. Por lo que es importante considerar este factor como un punto clave para la toma de decisiones referente al aprovechamiento de este recurso.

Según la International Renewable Energy Agency (IRENA) (2015), México se encuentra entre 15° y 35° de latitud, región considerada la más favorecida en recursos solares, donde se recibe diariamente, en promedio, 5,5 kWh/m² (la unidad de medición de radiación solar). (A., 2017)

Dada la extensión territorial del país y el nivel de irradiación, existe un alto potencial de instalar más de 1.800 GW de capacidad de generación en zonas con factores de planta menores al 20%, cifra equivalente a 28 veces la capacidad total instalada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) actualmente, de acuerdo con el estudio de 2021 de la Asociación Mexicana de Energía Solar (Asolmex). (Enlight, 2023)

Es oportuno mencionar que el desarrollo de la energía solar permite satisfacer la demanda energética del país de una manera sostenible y limpia, además se le puede atribuir que sus implementaciones permiten la creación de nuevos empleos.

2.4.1.3 EÓLICO

La energía eólica es aquella que utiliza la fuerza del viento para producir energía eléctrica, mediante aerogeneradores que mueven una turbina, se convierte la energía cinética en mecánica. Esta energía proviene de una fuente renovable, por lo que las emisiones de CO₂ son muy bajas. (Observatorio de Inteligencia del Sector Energético, 2022)

La capacidad de energía eólica de México ha aumentado rápidamente durante la última década, colocándolo en una buena posición para convertirse en un líder regional en energía eólica. (Mexico Energy Partners, 2021). Cabe destacar que este tipo de energía representó el 28,4% de generación renovable del país en el 2020, por lo que la convierte en la segunda energía limpia más predominante del país. En términos numéricos tuvo una generación total de 15.549,27 GWh, lo que se representa en tan solo un 5,88% de aporte a la matriz energética.

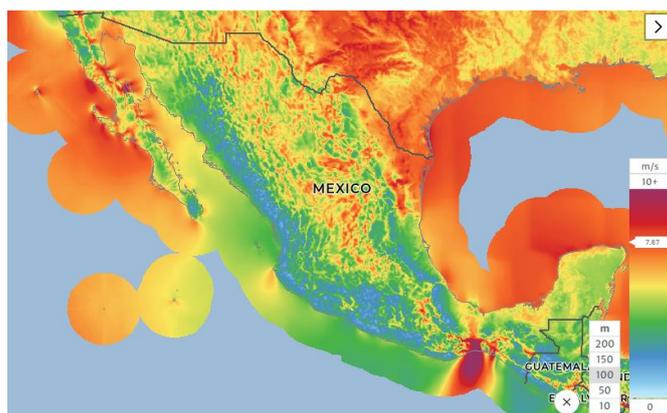


Figura 7: Potencial del viento en México (m/s). Fuente: (Global Wind Atlas, 2024)

La Figura 7 representa el potencial eólico presente en el territorio de México. Se puede interpretar como las zonas en rojo tienen una alta velocidad del viento y las zonas con vientos más débiles son localizados en color azul.

De manera general, el mapa obtenido a través de Global Wind Atlas ayuda a determinar las mejores ubicaciones para el desarrollo de parques eólicos. Resultando que las zonas con mayor potencial eólico son: Oaxaca, Chiapas, Veracruz, Baja California, Nuevo León, Coahuila, Tabasco y Tamaulipas. Pero primordialmente, el estado líder generador de energía eólica es Oaxaca. Y cabe destacar, que la base de datos WindPower menciona que Oaxaca tiene actualmente una capacidad instalada de 2997,375 MWe.

2.4.1.4 BIOMASA

La energía obtenida a partir de la biomasa es básicamente energía producida por desechos orgánicos de origen vegetal o animal, como madera o desechos de la agricultura.

En México la capacidad instalada para generar energía a partir de biomasa en 21 estados de la república sumó 646,37 MW y una generación de energía de 1.399,33 GWh. Veracruz es el estado que registró la mayor capacidad instalada con 264,06 MW, además de Jalisco, Tabasco y San Luis Potosí con 83,32, 41,7 y 40,7 MW, respectivamente.

Es importante mencionar que la biomasa representa otro tipo de fuente de energía renovable y que existen diversos productos que permitirían su explotación. Algunos residuos que podrían ser utilizados como fuente productora de biomasa son: Subproductos agrícolas, agroindustriales y forestales. (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). La Secretaría de Energía menciona que es posible estimar un potencial de generación de 3.642 MW para el futuro. En el 2020, alcanzó una generación total de 708,71 GWh. (SENER, 2020)

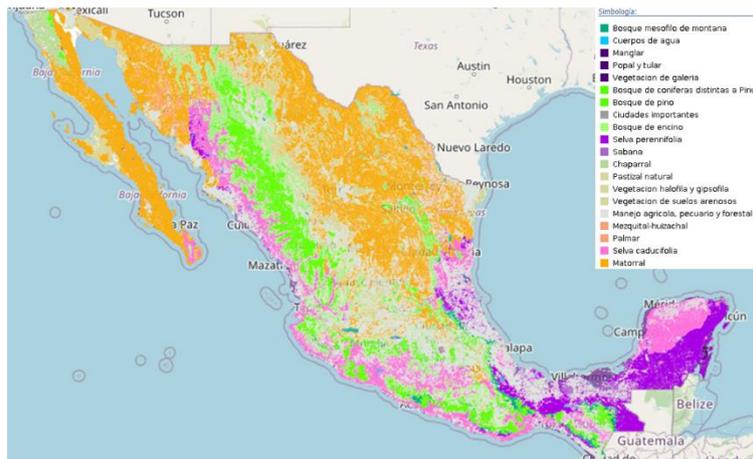


Figura 8: Uso de suelo y vegetación en México. Fuente: (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 1999)

La Figura 8 representa el uso de suelo y vegetación que se encuentra por todo el territorio mexicano, entre las cuales se puede notar la selva como un tipo de vegetación predominante desde el norte al sur, y en la parte norte debido a su clima seco predominan los matorrales.

El M.C Sergio Gasca Álvarez tiene un documento llamado Potencial generación de energía a partir de Biomasa en México publicado en el 2019, el cual describe como el país presenta un gran potencial de Energía por medio del manejo de bosques. En este sentido, se menciona que a través de los desechos de la selva se podría obtener 1.256.239 TJ, de los bosques de encinos una capacidad de 202.792 TJ y de los bosques de pino 82.362 TJ. (S., 2019)

Por lo que se puede concluir que hay una buena oportunidad de poder aprovechar estos desechos naturales como forma de generar electricidad, y que es necesario hacer un esfuerzo en la política pública para lograr incentivar el desarrollo de este tipo de proyectos.

La crisis energética actual ha empujado al ser humano a desarrollar métodos innovadores para generar electricidad y así poder satisfacer la demanda. Por lo que se ha enfocado mayormente en la búsqueda de oportunidades a través del uso de recursos naturales, en este caso, se puede mencionar el uso de la biomasa.

2.4.1.5 GEOTERMIA

La energía geotérmica es una fuente de generación renovable, que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor al interior de la Tierra. Para extraer el fluido geotérmico se perforan pozos de entre mil a 3 mil 500 metros de profundidad.

En 1959 se instala la primera planta geotermoeléctrica de México en Pathé, Hidalgo. Es considerada también como la pionera del continente americano.

Le siguieron la construcción de Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán, Los Humeros en Puebla y Las Tres Vírgenes en Baja California Sur. Los estados del país beneficiados con este tipo de generación son Baja California, Baja California Sur, Puebla, Veracruz y Michoacán. Se puede ver su ubicación representada en la siguiente imagen. (CFE, 2022)



Figura 9: Potencial geotérmico en México. Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2022)

De enero a octubre de 2021, los 4 campos aportaron a la red 3.668 GWh (3,32%) de la energía eléctrica y una capacidad instalada de 918 MW. En promedio una central de geotermia opera 7.380 horas en un año. (CFE, 2022)

Según datos de la Secretaría de Energía, en el año 2020 este tipo de energía se ubica en cuarto lugar con una contribución del 7,1% de la generación renovable de México, con un aporte del 3.880,98 GWh de generación neta.

En diciembre 2021, la CFE estableció un acuerdo de cooperación con la Embajada de Francia en México para desarrollar energía geotérmica, utilizando tecnología de ciclo binario, con recursos de los Fondos de estudios y Ayuda al Sector Privado (FASEP) del gobierno francés. (CFE, 2022)

2.4.1.6 NUCLEAR

Una central nuclear utiliza combustible nuclear para la generación de electricidad. Al dispositivo donde se produce una reacción nuclear controlada se le llama Reactor Nuclear.

El funcionamiento de una central nuclear es idéntico al de una central térmica que funcione con carbón, petróleo o gas excepto en la forma de proporcionar calor al agua para convertirla en vapor. En el caso de los reactores nucleares este calor se obtiene mediante las reacciones de fisión de los átomos del combustible. (Servicio Geológico Mexicano, 2017)

La propuesta original para impulsar la energía nucleoelectrica en México inicia en los años 50, cuando la Mexican Light & Power Company envía a un grupo de físicos e ingenieros a estudiar ingeniería nuclear a la Universidad de Michigan en Ann Arbor, Estados Unidos. La finalidad era contar con ingenieros nucleares capacitados para la operación de reactores nucleares.

En 1956 se crea la Comisión Nacional de Energía Nuclear (que más tarde se convertiría en el Instituto Nacional de Energía Nuclear y después en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, ININ). En esta se discute qué tipo de reactor nuclear para la producción de energía tendría que instalarse, si uno cuyo combustible fuera uranio natural u otro con uranio enriquecido. La instalación de los reactores nucleares se va postergando hasta los años 60 cuando llega a la presidencia Adolfo López Mateos.

Finalmente, durante la década de los 60 y 70 se toma la decisión de construir una planta nuclear para la producción de energía eléctrica en el estado de Veracruz. Este proyecto se echó a andar durante la presidencia de Carlos Salinas, en 1989. (Ciencia UNAM-DGDC, 2022)

La Central Nucleoelectrica Laguna Verde (CNLV) es la única planta generadora de energía eléctrica a través de la fisión nuclear en México y se localiza en Veracruz como se puede observar

en la Figura 10. La primera unidad con una capacidad actual de 805 MW y la segunda unidad con 803 MW. Con una producción total de 1.608 MW.



Figura 10: Ubicación de la Central Nuclear Laguna Verde en México. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Secretaría de Energía se puede mencionar que, durante el año 2020, la energía nuclear generó 9.603,90 GWh, siendo un 3,63% de generación neta del país. La energía nuclear brinda diversas ventajas, como son: generación de electricidad de manera constante, no genera emisiones de carbono y su alta eficiencia durante la transformación.

2.4.1.7 PETRÓLEO

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por carbono e hidrógeno. Los átomos de carbono unidos forman la columna vertebral del compuesto, mientras que los de hidrogeno se unen a los átomos de carbono formando diferentes configuraciones. Los hidrocarburos son los principales componentes del petróleo y del gas natural, sirven como combustibles y lubricantes, y son materia prima para la producción de plásticos. (Carey, 2018).

En la parte más profunda del Golfo de México se localizan, tirantes de agua superiores a 500 metros que cubre una superficie aproximada de 575.000 km². Pemex Exploración y Producción, considera que ésta es la región de mayor potencial, con un recurso prospectivo de 29,500 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (mbpce), lo que representa 56 % del recurso total del país.

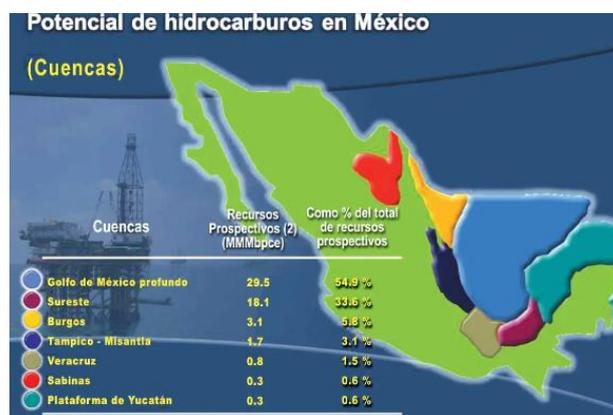


Figura 11: Potencial de hidrocarburos en México. Fuente: (Potencia natural, 2008)

La Figura 11 hace referencia al potencial de las reservas de hidrocarburos en el territorio mexicano. Actualmente, la explotación de petróleo en aguas profundas en el Golfo de México

costará 2.190 millones de dólares en los próximos 3 años, sólo por concepto de la renta diaria de las 4 plataformas de perforación. Estos recursos son 3,19 veces mayores a los que se destinarán a impulsar la transición energética. (Servicio Geológico Mexicano, 2023)

La obtención de los datos respecto a la cantidad de hidrocarburos permite conocer el escenario en el que se encuentra el país, es la manera en que se determina que tanto tiempo puede durar este recurso en México de la manera en que se está utilizando hasta el día de hoy. Sin embargo, existen grandes áreas que no se han explorado, y por lo tanto no han sido cuantificadas.

El país le está apostando fuertemente en la exploración de hidrocarburos, por lo que se puede entender que la demanda seguirá en aumento y por lo tanto se requiere satisfacer esa necesidad. El desafío principal es poder producir volúmenes suficientes con un costo asequible para hacer frente a la demanda energética del país.

2.4.1.8 CARBÓN

La producción nacional de carbón, en 2017, fue de 12,7 millones de toneladas, lo que representó una ligera reducción, cercana al 6,8%, con respecto a los 13,6 millones de toneladas producidas en 2016. Coahuila es el principal productor de carbón en México, aunque Sonora también ha registrado producción desde 2003. (Secretaría de Economía, 2020)

La C.T. José López Portillo (la central) está ubicada en Nava, Coahuila, cuenta con cuatro unidades con capacidad para generar 300 megawatts (MW) de energía eléctrica, cada una, las cuales operan con carbón como principal combustible; el consumo de carbón anual estimado es de 4.900 miles de toneladas. En el 2020, estas centrales tuvieron una generación neta de 10.742,04 GWh. (SENER, 2020)



Figura 12: Zonas potenciales de Carbón en México. Fuente: (Servicio Geológico Mexicano, 2017)

En la Figura 12 se puede comprender como Coahuila es la región más importante del país, aportando en la actualidad, prácticamente el 100% de la producción nacional de carbón. Esta región está ubicada en la parte centro, norte y noreste del Estado; limitada por la frontera con Estados Unidos al norte y al este, por los estados de Nuevo León y Tamaulipas.

De acuerdo con varios trabajos de exploración y explotación, realizados principalmente por el Consejo de Recursos Minerales (SGM), Comisión Federal de Electricidad, Altos Hornos de México y varias empresas particulares, se han podido definir tres cuencas donde se tiene determinada

la presencia de carbón mineral y las cuales se conocen con los nombres de: Sabinas - Monclova, Fuentes - Río Escondido y Burgos (Colombia – San Ignacio). (Secretaría de Economía, 2020)

2.5 CONCLUSIÓN SOBRE MÉXICO

México es un país económicamente en desarrollo en el continente americano, su ubicación favorece el desarrollo de energías renovables, principalmente por recursos solares y eólicos.

Si bien el territorio mexicano tiene la capacidad de convertirse en líder de la transición energética, se puede decir que su avance en el sentido de implementación de energías renovables ha sido lento, debido principalmente a las brechas y cambios en las políticas actuales.

En términos energéticos, el país muestra una dependencia hacia los combustibles fósiles provenientes del extranjero para satisfacer la demanda de su población, lo que puede entenderse como una debilidad en su matriz energética. El problema con los recursos fósiles como es el petróleo y el gas es que la complejidad de obtenerlos encarece sus costos, especialmente cuando provienen de zonas políticamente inestables.

Desde el punto de vista de la generación de electricidad, se puede observar cómo el país está cambiando el petróleo por gas natural, por lo que lo representa al recurso más utilizado para el contexto energético.

El gobierno de México sigue fiel a sus compromisos y acuerdos internacionales respecto a la reducción de emisiones de carbono y la implementación de energías renovables en el país. Para esto se han implementado diversos programas de eficiencia energética que incluyen modificación de los hábitos y la sustitución de tecnología obsoleta.

Finalmente, el camino hacia la sostenibilidad mexicana representa un área de oportunidad para el país, en el que es posible combatir el calentamiento global brindando un mejor desarrollo económico debido a la apertura hacia nuevas tecnologías y conocimientos.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En el presente apartado se presenta la metodología para llevar a cabo el trabajo académico. Se comienza desde un análisis previo de los antecedentes de México, seguido del estudio energético de la situación actual para conocer su escenario tendencial (BAU). A partir de la obtención del escenario BAU, se crea un escenario sostenible donde se establecen las estrategias a implementar para poder desarrollar una transición hacia la sostenibilidad energética en el territorio mexicano.

Posteriormente, se realiza el apartado de análisis y comparación de resultados para estudiar los valores obtenidos en los indicadores y se finaliza el trabajo académico con una conclusión representativa de la proyección para el desarrollo sostenible de México.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

1. Análisis general de la situación energética en México

Es esencial realizar una lectura previa acerca de la posición energética en la que se encuentra México. Para esto, se procede a leer diversos documentos oficiales del gobierno nacional mexicano, entre ellos el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) para conocer el panorama que se plantea en futuro para hacer frente a la transición energética.

2. Obtención de datos de IEA

Este paso se lleva a cabo por medio de la recopilación de los datos del consumo energético del país en los diversos sectores, como son: industrial, transporte, servicios, doméstico y agricultura y pesca. Se considera también la fuente energética de donde proviene el consumo, las cuales son carbón, gas natural, energías renovables, energía nuclear, electricidad y petróleo.

Los datos provienen de International Energy Agency (IEA), lo que los convierte en una fuente confiable para poder realizar un correcto análisis. Es importante mencionar que para esta proyección solo fueron encontrados los datos actualizados hasta el año 2020, lo que significa que el análisis se comienza a partir de este año y finaliza en el 2035.

3. Estimación de los ritmos de variación anual de la demanda

Para conocer la futura demanda energética se evalúa el ritmo de desarrollo económico que es el Producto Interno Bruto (PIB) y en conjunto con el crecimiento demográfico del país. Los datos son recabados directamente del Banco Mundial a partir del período 1990 al 2020. Estos ritmos de crecimientos son muy relevantes porque a partir de estos valores, se permite la correcta obtención de los escenarios energéticos.

4. Desarrollo y obtención del escenario BAU

El escenario tendencial o Business As Usual (BAU) para el sector energético, es aquel que considera el desarrollo predominante actual y es capaz de predecir el comportamiento a futuro

manteniendo la misma tendencia de crecimiento. Para la obtención del escenario, se realiza en un periodo de 15 años, el cual comienza a partir del 2020 y finaliza en el 2035.

5. Implementación de medidas para el desarrollo del escenario sostenible

El escenario sostenible representa las futuras implementaciones al escenario BAU para poder contribuir a la proyección de sostenibilidad energética para el territorio durante el periodo de análisis desde el 2020 al 2035.

En este apartado se comienzan a variar las contribuciones energéticas de las fuentes de energía (carbón, gas natural, energías renovables, energía nuclear, electricidad y petróleo) durante el horizonte de tiempo planteado a través de la implementación de medidas sostenibles.

Las medidas pueden ser desde mejoras de eficiencia energética, así como también la implementación de sustitución de las fuentes de energías por el uso de energías renovables.

6. Análisis y comparación de resultados

En esta sección se realiza un análisis y comparación entre los dos escenarios planteados (BAU y el Sostenible) donde es posible observar el impacto que tendrán las mejoras implementadas. Asimismo, permite conocer los compromisos que se tienen que realizar para poder cumplir los objetivos planteados de reducir las emisiones de carbono al menos un 13% respecto al tendencial.

Es importante realizar un detenido análisis para poder llegar a los resultados esperados debido a que esto da paso hacia la toma de decisiones asertivas para la transición energética del país, y se determina si es necesario un incremento acelerado del Plan sostenible. Para obtener un análisis correcto, se cuenta con indicadores que permiten la medición cuantitativa de la implementación de las medidas.

7. Conclusiones

Representa la finalización del proyecto elaborado en donde se concluyen los aprendizajes esperados y se analizan de manera general los resultados obtenidos.

La metodología descrita se muestra de manera general en la Figura 13.

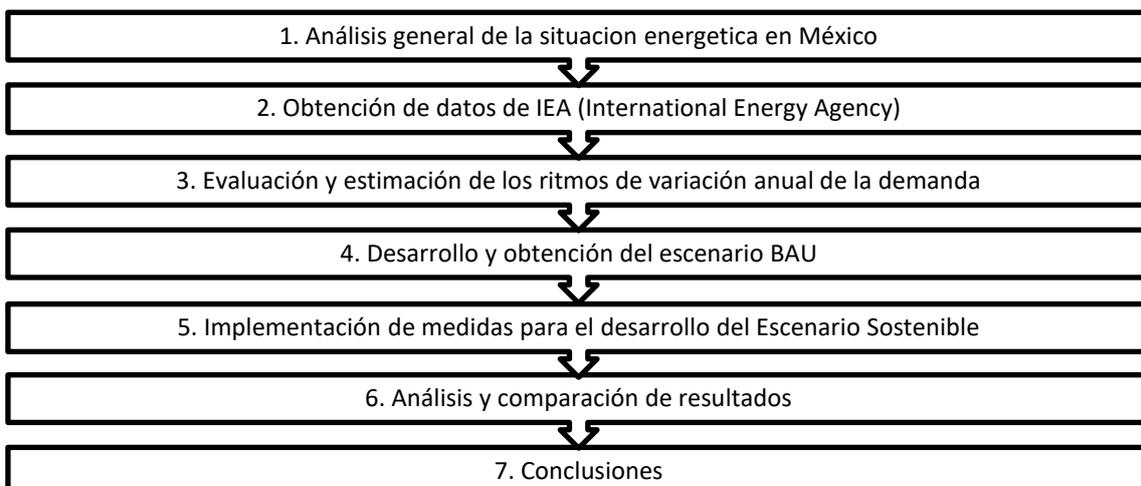


Figura 13: Metodología para la elaboración del trabajo académico. Fuente: Elaboración propia

3.2 DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada representan la base de datos obtenida en los diversos sitios confiables. En este caso, se muestran los datos de consumo energético de México del año 2020 por parte de la International Energy Agency (International Energy Agency, 2022)

Como se puede observar en la Figura 14, la información comienza con el abastecimiento total proveniente de las diversas fuentes de energía y como después las energías primarias sufren transformaciones en las plantas de refinamiento y transformación. Y finalmente, el proceso llega al usuario final como el consumo energético, que es dividido por sectores (industrial, electricidad, transporte, residencial, comercial y servicios, agricultura y forestal y pesca).

Para el análisis se decide juntar dos de los sectores, el de Agricultura y forestal y pesca, y se convierte en uno solo, llamado Agricultura y Pesca. Lo que resulta en un total de 6 sectores que son analizados durante el proyecto.

Los datos son representados por las unidades de terajulios (TJ), los cuales se convierten a kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep) con el fin de poder ser analizadas en la hoja de cálculo respecto a las emisiones de carbono. Para la conversión se considera un valor equivalente de: 1 ktep=41,87 TJ

TJ	Carbón	Petróleo	Productos Petroíferos	Gas Natural	Nuclear	Hidro	Geotermin, Solar, etc	Biofuel y residuos	Electricidad	Calor	TOTAL
Producción	183932	4099316	0	1138107	88702	96541	225321	367129	0	0	6199048
Importación	177896	17743	1846285	2211539	0	0	0	0	35874	0	4289317
Exportación	-77	-2589612	-305728	-32	0	0	0	0	-21438	0	-2916887
Bunkers Marinos Internacionales	0	0	-8557	0	0	0	0	0	0	0	-8557
Bunkers Aviáticos internacionales	0	0	-81396	0	0	0	0	0	0	0	-81396
Modificaciones de Stock	7249	-63654	-27397	6924	0	0	0	0	0	0	-76878
TPES	369000	1463793	1425188	3356537	88702	96541	225321	367129	14436	0	7406647
Transferencias	0	-186340	194345	0	0	0	0	0	0	0	28005
Diferencias Estadísticas	-32867	129807	-142466	-1027348	0	0	0	-16218	-51378	0	-1140470
Plantas Gener Electricidad	-186825	0	-423545	-1161127	-88702	-96541	-209041	-52200	1040742	0	-1177239
Plantas de Cogeneración	0	0	-12537	-133968	0	0	0	-27778	91634	0	-82649
Plantas Gener Calor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gas	0	0	-28967	9832	0	0	0	0	0	0	-19135
Refinerías de Petróleo	0	-1430175	1368567	0	0	0	0	0	0	0	-61608
Transformaciones de Carbón	-35296	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-35296
Plantas de Licuefacción	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otras Transformaciones	0	2915	-2430	0	0	0	0	0	0	0	485
Energía utilizada en la propia Industria	-14321	0	-131352	-574366	0	0	0	0	-30420	0	-750459
Pérdidas	0	0	0	0	0	0	0	0	-133147	0	-133147
CONSUMO FINAL	99691	0	2246803	469561	0	0	16280	270933	931867	0	4035136
Industria	96616	0	200909	425184	0	0	1301	52906	510505	0	1287421
Transporte	0	0	1511858	1627	0	0	0	0	3679	0	1517164
Residencial	0	0	216889	23351	0	0	9014	218027	214556	0	681837
Comercial y Servicios	0	0	59968	8550	0	0	5965	0	9544	0	170027
Agricultura y Forestal	0	0	79111	0	0	0	0	0	43690	0	122801
Pesca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sin-especificar	0	0	0	0	0	0	0	0	63893	0	63893
Uso no energético	3076	0	178067	10849	0	0	0	0	0	0	191992

Figura 14: Energía primaria en México. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022)

Asimismo, se obtienen los valores de la demanda energética del país por sector a través de los años, comenzando desde 1990 hasta el 2020 de la base de datos de IEA. (International Energy Agency, 2022). Estos valores son muy importantes porque permiten la obtención del ritmo de crecimiento de la demanda energética para los futuros escenarios.

Se consigue traspasar los datos obtenidos para cada sector en la hoja de cálculo. Dichos valores, se pueden ver en la Tabla 1, donde la demanda energética es representada en unidades de ktep para cada sector.

Tabla 1: Consumo energético (ktep) proveniente de cada sector en México. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022)

Año	Industrial	Transporte	Servicios	Doméstico	Agricultura y Pesca
1990	25.752	28.305	1.481	15.749	2.241
1991	25.776	30.312	2.120	15.903	2.280
1992	25.408	30.437	2.371	16.856	2.221
1993	24.690	31.138	2.569	16.783	2.253
1994	25.158	33.044	2.795	17.270	2.206
1995	25.303	30.351	2.802	17.323	2.267
1996	26.649	31.108	2.752	17.267	2.476
1997	27.327	32.446	2.842	17.212	2.606
1998	28.118	33.322	3.003	17.708	2.606
1999	27.174	34.265	3.042	17.036	2.853
2000	27.846	35.842	3.407	18.023	2.836
2001	25.436	36.643	3.500	17.578	2.783
2002	26.622	37.331	3.581	17.663	2.681
2003	27.850	39.568	2.904	18.046	2.824
2004	29.539	41.715	3.420	17.833	2.895
2005	30.831	44.234	3.412	17.681	3.128
2006	33.258	46.607	3.586	17.641	3.240
2007	32.401	49.243	3.528	17.768	3.308
2008	33.507	51.254	3.540	17.897	3.432
2009	28.921	50.123	3.513	17.643	3.596
2010	32.762	51.085	3.545	17.801	3.523
2011	35.485	51.425	3.616	17.936	3.819
2012	35.120	51.690	3.701	18.023	3.983
2013	36.058	51.123	3.903	17.544	3.782
2014	33.807	51.285	3.903	17.740	3.761
2015	35.359	51.093	3.987	17.772	3.995
2016	35.061	52.939	3.969	17.764	4.145
2017	37.941	51.418	3.936	17.682	4.225
2018	31.784	50.084	4.370	17.793	4.403
2019	33.526	51.022	4.305	17.690	4.209
2020	30.748	36.235	4.061	16.285	2.933

Por otro lado, es necesario la obtención de los registros de los datos históricos del Producto Interno Bruto (PIB), crecimiento demográfico y de los factores de emisión de la energía primaria y final.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) el Producto Interno Bruto (PIB) es la suma de los valores de mercado de todos los servicios y bienes finales producidos por los recursos (trabajo y capital) de la economía que residen en el país. (INEGI, 2012).

El crecimiento demográfico también puede ser conocido como crecimiento poblacional. Su significado hace referencia al incremento de la cantidad de personas en un tiempo determinado.

La razón por la que se toman en cuenta estos registros es porque cada año el aumento de la población ocasiona que la demanda energética crezca para poder satisfacer las necesidades de los seres humanos. Respecto al PIB, su desarrollo acelerado significa que existe mayor actividad

productiva y adquisición de bienes, resultando en un mayor consumo energético para el funcionamiento de dichas partes.

Los datos del PIB y del crecimiento demográfico son recabados del Banco Mundial a partir del año 1990 al 2020, y se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos de crecimiento poblacional y el Producto Interno Bruto en México. Fuente: Elaboración propia con datos del (Banco Mundial, 2023)

Año	Población	PIB (Mil millones 2010 USD)
1990	81,72	620,68
1991	83,35	645,74
1992	84,99	668,39
1993	86,65	688,90
1994	88,31	722,94
1995	89,97	677,46
1996	91,59	723,34
1997	93,18	772,87
1998	94,77	812,78
1999	96,33	835,16
2000	97,87	876,44
2001	99,39	872,90
2002	100,92	872,55
2003	102,43	885,17
2004	103,95	919,87
2005	105,44	941,10
2006	106,89	983,40
2007	108,30	1005,94
2008	109,68	1017,44
2009	111,05	963,66
2010	112,53	1012,98
2011	114,15	1050,09
2012	115,76	1088,34
2013	117,29	1103,07
2014	118,76	1134,51
2015	120,15	1171,87
2016	121,52	1202,70
2017	122,84	1228,11
2018	124,01	1255,07
2019	125,09	1252,57
2020	126,00	1152,52

Para finalizar con los datos de entrada, se toman en cuenta los factores de emisiones de CO₂ que se producen de cada forma de energía primaria por los distintos sectores.

Estos factores representan la cantidad de contaminación emitida hacia la atmosfera originada por la realización de una actividad. Se puede entender que las emisiones de carbono son diferentes si provienen ya sea del gas natural, petróleo, carbón, entre otros lo que ocasiona la obtención de un grado de contaminación mayor o menor.

Durante el siguiente proyecto, se consideran estos factores para poder cumplir con el objetivo de reducción del 13% emisiones de carbono, y paralelamente, brindar un cumplimiento al acuerdo de París y a la Agenda 2030.

Al realizar la aplicación de dichos valores en la hoja de cálculo, se pueden ver de la siguiente manera:

Tabla 3: Factores de emisiones de CO² por cada sector. Fuente: (Foro Nuclear, 2023)

	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas Natural	Renovables	Nuclear
Industrial	0	4,8	3,5	2,5	0	0
Transporte	0	0,0	3,4	2,5	0	0
Servicios	0	4,8	3,5	2,5	0	0
Doméstico	0	4,8	3,5	2,5	0	0
Agric. y Pesca	0	4,8	3,5	2,5	0	0
Gen.Electricidad	3,4	5,6	4,0	3,8	0	0

Los datos mostrados en la Tabla 3 son obtenidos directamente del prontuario Energía 2023 del Foro de la Industria Nuclear Española.

3.3 RITMOS DE CRECIMIENTO

Para definir los escenarios energéticos se utilizan los ritmos de crecimiento, los cuales determinan la predicción de una variable a lo largo del tiempo considerando los datos históricos. Para el cálculo de los ritmos de crecimiento se realizan dos métodos distintos, análisis de regresión y con la fórmula de ritmo de crecimiento.

El ritmo de crecimiento es obtenido a través de la utilización de la siguiente fórmula:

$$R.C = \left(\frac{\text{Valor presente}}{\text{Valor pasado}} \right)^{\frac{1}{n^{\circ} \text{ de periodos} - 1}}$$

Los sectores del transporte, doméstico, población y PIB son obtenidos directamente con la utilización de la fórmula de ritmo de crecimiento anteriormente mencionada. Y el método de análisis de regresión se utiliza para los sectores industrial, servicios y agricultura y pesca.

Los ritmos de crecimiento son calculados tomando en cuenta los datos obtenidos desde el año 1990 hasta el 2020. Cabe destacar, que el origen de los valores a utilizar durante la realización de los cálculos puede ser observado en las Tablas 1 y 2.

A continuación, se explica detalladamente como se realizan los cálculos para obtener el ritmo de crecimiento para cada sector.

Para el sector del transporte, se consideran los datos del consumo energético 28.305 y 51.022, para los años 1990 y 2019, respectivamente. Entonces, el cálculo se puede obtener de la siguiente manera:

$$R.C = \left(\frac{51.022}{28.305} \right)^{\frac{1}{2019-1990} - 1} * 100 = 2$$

Para el sector doméstico se consideran los datos del consumo energético 15.749 y 17.690, para los años 1990 y 2019, respectivamente. Entonces, el cálculo se puede obtener de la siguiente manera:

$$R.C = \left(\frac{17.690}{15.749} \right)^{\frac{1}{2019-1990}} - 1 * 100 = 0,4$$

Para el crecimiento demográfico se calcula con los datos 81,72 y 125,09 para los años 1990 y 2019, respectivamente. Entonces, el cálculo se puede obtener de la siguiente manera:

$$R.C = \left(\frac{125,09}{81,72} \right)^{\frac{1}{2019-1990}} - 1 * 100 = 1,4$$

Para el Producto Interno Bruto se consideran los datos de 1252,57 y 620,68 para los años 1990 y 2019, respectivamente. Entonces, el cálculo se puede obtener de la siguiente manera:

$$R.C = \left(\frac{1252,57}{620,68} \right)^{\frac{1}{2019-1990}} - 1 * 100 = 2,4$$

Por otra parte, para el método de regresión lineal se considera la Figura 15.

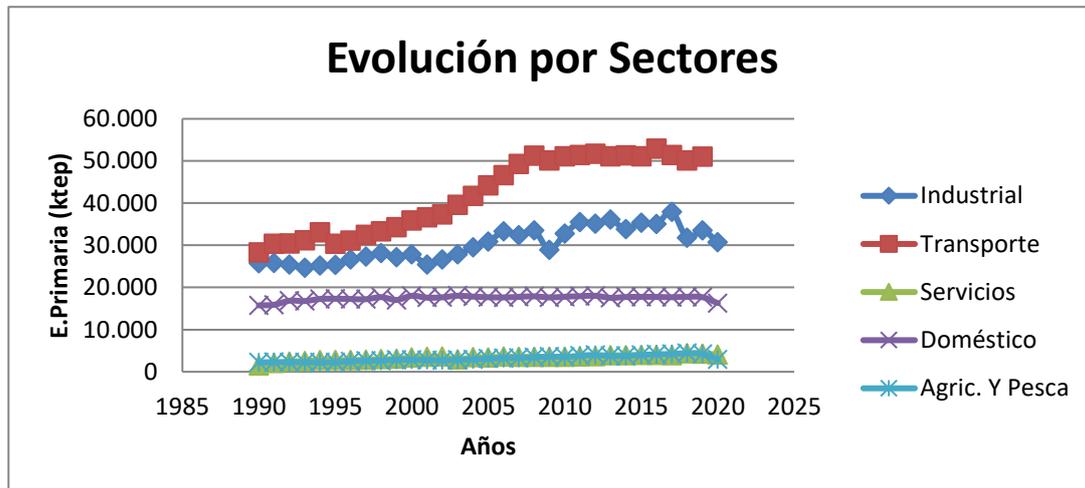


Figura 15: Evolución del consumo de Energía primaria por cada sector de 1990-2020. Fuente: Elaboración propia con datos del (International Energy Agency, 2022)

A partir de la Figura 15 se puede obtener la ecuación de regresión lineal y el valor del coeficiente de determinación (R^2).

La utilización de R^2 es con el fin de poder medir la predicción lineal del modelo. Es decir, los valores de esta variable pueden ser de 0 a 1, y obtener resultados a partir del 0,8 al 1 representan un valor con alto grado de fiabilidad.

Comenzando por el sector industrial, se obtiene la ecuación (1), donde:

$$Y = 379,03x - 729779 \quad (1)$$

$$R^2 = 0,74$$

Se sustituyen los valores de la ecuación (1) para el año 2010 y 2022 considerándolos como el valor x. Entonces, el cálculo se puede obtener de la siguiente manera:

$$Y = 379,03 (2019) - 729779 = 32.071$$

$$Y = 379,03 (2022) - 729779 = 36.620$$

A partir de la obtención de los valores anteriormente calculados es posible utilizar la fórmula para el ritmo de crecimiento.

$$R.C = \left(\frac{36.620}{32.071} \right)^{\frac{1}{2022-2010}} - 1 * 100 = 1,02$$

Para el sector de servicios, se obtiene la ecuación (2), donde:

$$Y = 66,81x - 130617 (2)$$

$$R^2 = 0,85$$

Se sustituyen los valores de la ecuación (2) para el año 2010 y 2022 considerándolos como el valor x. Entonces, el cálculo se puede obtener de la siguiente manera:

$$Y = 66,81 (2010) - 130617 = 3.671$$

$$Y = 66,81 (2022) - 130617 = 4.473$$

A partir de la obtención de los valores anteriormente calculados es posible utilizar la fórmula para el ritmo de crecimiento.

$$R.C = \left(\frac{4.473}{3.671} \right)^{\frac{1}{2022-2010}} - 1 * 100 = 1,53$$

Para el sector de agricultura y pesca, se obtiene la ecuación (3), donde:

$$Y = 70,428x - 138063 (3)$$

$$R^2 = 0,84$$

Se sustituyen los valores de la ecuación (3) para el año 2010 y 2022 considerándolos como el valor x. Entonces, el cálculo se puede obtener de la siguiente manera:

$$Y = 70,428 (2010) - 138063 = 3.497$$

$$Y = 70,428 (2022) - 138063 = 4.342$$

A partir de la obtención de los valores anteriormente calculados es posible utilizar la fórmula para el ritmo de crecimiento.

$$R.C = \left(\frac{4.342}{3.497} \right)^{\frac{1}{2022-2010}} - 1 * 100 = 1,67$$

En la Tabla 4 se muestra de manera resumida los valores de ritmo de crecimiento obtenidos para cada sector y que son utilizados para la realización del trabajo académico.

Tabla 4: Ritmos de crecimiento para cada sector de México. Fuente: Elaboración propia

Sector	Ritmo de variación de la demanda (%)
Industrial	1,1
Servicios	1,6
Agricultura y pesca	1,7

Transporte	2,0
Doméstico	0,4
Población	1,4
PIB	2,4

Los ritmos de variación de la demanda energética del país son una de las variables más importantes durante la realización del análisis de la matriz energética. Esta variable se entiende como la futura demanda de energía requerida por cada sector, y por lo tanto debe ser cubierta por medio del incremento de generación eléctrica.

En términos generales, se puede entender que la demanda energética realmente aumentara con el tiempo. A continuación, se realiza una breve explicación para poder tener un mayor entendimiento del origen de los valores de los ritmos de crecimiento para cada sector:

- Industrial: Muestra un crecimiento tenue del 1,1% por las consecuencias de la reciente pandemia y primordialmente por el actual conflicto Rusia a Ucrania y el de Israel a Gaza lo que ocasiona una incertidumbre para las inversiones industriales.
- Servicios: La demanda de servicios muestra un crecimiento importante del 1,6% debido al crecimiento del Producto Interno Bruto.
- Agricultura y pesca: El sector presenta un 1,7% de crecimiento positivo debido a que el gobierno de México se encuentra apoyando al rubro por medio de la ejecución de programas de rescate del campo como fuente de bienestar y brindando apoyos económicos a productores de pequeña y mediana escala.
- Transporte: El sector presenta un cambio exponencial del 2,0% debido a la creciente adquisición de automóviles privados por la población ocasionada por el bajo desarrollo del transporte público.
- Doméstico: Tendrá un ligero crecimiento del 0,4% debido a que existe un aumento de la transformación inteligente de espacios ya existentes de manera que los lugares pueden ser mejor aprovechados por más personas, lo que también beneficia en un consumo eficiente de energía.
- Población: Para el caso del crecimiento poblacional se consideran las estadísticas recabadas directamente del Banco mundial, y por medio de la utilización de la fórmula de ritmo de crecimiento resulta en un crecimiento del 1,4%.
- PIB: Su crecimiento previsto del 2,4% es debido a su incremento en el intercambio comercial con Estados Unidos y Canadá beneficiado por su tratado libre de comercio (T-MEC) entre las naciones. Lo que también ha impulsado la estrategia llamada “nearshoring”, que es donde las empresas externas buscan invertir para producir en lugares cercanos al país contratante.

3.4 ESCENARIOS ENERGÉTICOS

La realización del análisis de la matriz energética considera dos diferentes escenarios energéticos, los cuales son el tendencial (BAU) y el sostenible para el periodo de tiempo desde el año 2020 al 2035.

Para la correcta elaboración de los escenarios, se consideran diversos factores que podrían incidir en la demanda energética mexicana, como lo son: aspectos económicos, sociales, el

medioambiente, implementación de las tecnologías energéticas y el gobierno en materia energética.

3.4.1 ESCENARIO TENDENCIAL

El escenario tendencial es entendido como aquel que predice el futuro considerando el mismo comportamiento presentado desde el momento actual hasta el fin del periodo del análisis (2020-2035).

En este caso, se proponen las siguientes hipótesis para el escenario tendencial:

- Incremento de la demanda de energía eléctrica proveniente de los ritmos de crecimiento de los datos desde 1990 hasta el 2020.
- La generación de electricidad mantiene un rendimiento medio de generación deducido de los datos del 2020, siendo un 35,68%
- Se mantienen constante a largo del periodo los porcentajes de contribución de cada fuente al consumo de cada sector de demanda.
- Se mantiene constante la contribución de energía nuclear en el valor del año 2020, debido a la inviabilidad de aumentar la potencia instalada.
- El incremento de demanda que debería aportar la energía nuclear se asigna a gas natural basado en sus políticas energéticas actuales, en las que se enfatiza la utilización de este recurso.

Las propuestas anteriores marcan la tendencia que presenta el escenario BAU. En donde se tiene un aumento de la demanda energética debido al aumento de la población y al mejoramiento de la economía del país.

El rendimiento medio de la generación eléctrica es de un 35,68%, el cual fue obtenido a partir de los datos del 2020 y se mantendrá durante el análisis. Para los porcentajes de contribución de cada sector se van a mantener constantes por el periodo 2020-2035. Asimismo, se mantiene en operación la única planta nuclear, por lo que se tiene la misma contribución desde el año 2020.

El aumento de la demanda es cubierto por medio de la utilización de combustibles fósiles como son el gas natural y el petróleo debido a que el país se encuentra primordialmente enfocado en la independencia energética basado en sus políticas energéticas. En donde busca el desarrollo de refinerías y con esto disminuir la dependencia de hidrocarburos provenientes del extranjero.

3.4.2 ESCENARIO SOSTENIBLE

Para el escenario sostenible se aplican medidas de sostenibilidad en el área energética con el fin de reducir las emisiones de carbono provenientes de la misma demanda de energía de los diferentes sectores. Las medidas consideran el incremento de la participación de las energías renovables y la transición hacia una electromovilidad.

En este caso, se proponen las siguientes premisas para el escenario sostenible:

- Incremento de la demanda de energía eléctrica proveniente de los ritmos de crecimiento de los datos desde 1990 hasta el 2020.
- La generación de electricidad mantiene un rendimiento medio de generación deducido de los datos del 2020, siendo un 35,68% debido a su obtención a partir de los datos del 2020.

Asimismo, se implementan las siguientes medidas de sostenibilidad:

- Se presenta una variación de los porcentajes de contribución de los recursos de energías renovables, carbón, gas natural y nuclear para el sector de generación de electricidad proveniente de la implementación de las medidas de sostenibilidad.
- Se aumenta la contribución de energía nuclear a partir del año 2032, debido a la posibilidad de aumentar la potencia instalada por medio de la implementación de tres reactores ABWR siendo un total de 4.050 MWe para el fin del período de análisis en 2035.
- Sustitución progresiva del uso de carbón para generación eléctrica comenzando en el año 2025 y finalizando en el 2027 debido a la transición energética hacia las energías renovables y a la necesidad de reducir las emisiones carbono.
- Se plantea la transición hacia la electromovilidad desde el año 2023 al 2035 donde se busca una sustitución de coches de combustibles fósiles por eléctricos en base a los compromisos internacionales que tiene México para reducir los gases de efecto invernadero.
- Se impulsa la generación eléctrica a partir de energías renovables como son la eólica y solar durante todo el periodo de análisis debido a la abundancia de los recursos de país y la alineación del compromiso internacional hacia una transición para el desarrollo sostenible.
- Desarrollo y mejora de las centrales hidroeléctricas con el fin de aumentar su potencia instalada a partir del 2025 en base a sus políticas actuales y proyecciones gubernamentales de mejorar las infraestructuras existentes y continuación de proyectos detenidos.
- Se considera el inicio de la energía eólica offshore en México en el 2032 debido a que a los países vecinos (Estados Unidos y Brasil) se encuentran en proceso de construcción de plantas eólica marinas, además se considera la viabilidad debido a la existencia de estudios previos del desarrollo eólico marítimo México en el 2020.

3.5 INDICADORES

La utilización de indicadores permite una sencilla visualización de los resultados obtenidos, así como también permite la comparación entre los valores de la situación tendencial con la sostenible y con esto poder determinar si se están cumpliendo los objetivos determinados.

Los indicadores se han agrupado de la siguiente manera: ambiental, socio-económico, energéticos y energías renovables

Primeramente, para los indicadores ambientales se consideran 4 indicadores como los más fundamentales para medir la evolución de los escenarios. Estos permiten un análisis integral para poder garantizar un camino hacia la sostenibilidad energética.

Los indicadores ambientales son conformados por los siguientes: emisiones de carbono per cápita, relación entre emisiones de CO₂ y el PBI y por ultimo las emisiones de CO₂ reducidas relacionadas a la energía consumida.

Seguidamente, los indicadores socio-económicos representan un impacto en el sector energético debido a que están estrechamente ligados con la demanda energética del país. Para los cuales se consideran 2 indicadores socio-económicos, como son: Producto Interno Bruto per cápita (PIB/hab) y Dependencia exterior (%).

Los indicadores energéticos se encuentran marcados por 3 distintos tipos: consumo de energía final, energía primaria per cápita y el consumo de energía final per cápita. Los tres contemplan el mismo objetivo que es buscar una reducción del consumo energético.

Finalmente, se tiene el indicador de energías renovables. El cual tiene el objetivo de incrementar la penetración de las energías renovables para la producción de la energía primaria en el país.

3.5.1 RESUMEN INDICADORES

A continuación, se presenta una tabla como resumen de los indicadores utilizados, añadiendo una breve descripción y objetivo del indicador.

Tabla 5: Indicadores para el trabajo académico. Fuente: Elaboración propia

	Indicador	Unidad	Descripción	Objetivo
Ambiental	Emisiones CO ₂ per cápita.	tCO ₂ /tep	Emisiones CO ₂ respecto al consumo de energía primaria por persona.	Reducción de emisiones de carbono.
	Relación entre emisiones de CO ₂ y el PBI	tCO ₂ /MUSD 2020	Emisiones producidas por el consumo de energía primaria respecto a la riqueza por persona.	Reducir las emisiones de CO ₂ para generar una unidad de riqueza sin bajar la producción.
	Emisiones de CO ₂ per cápita	tCO ₂ /hab	Emisiones de CO ₂ respecto al consumo energético por persona.	Reducción de las emisiones de carbono.
	Emisiones de CO ₂ respecto a la energía consumida	Kt	Reducir las emisiones de CO ₂ anuales respecto a la energía consumida.	Reducir las emisiones de CO ₂ (kt) respecto a la energía consumida
Socio-económico	Producto Interno Bruto per cápita.	MUSD 2020/hab	Riqueza económica del país por persona.	Mantener el desarrollo económico.
	Dependencia exterior	%	Importaciones netas respectivas al suministro total de la energía primaria.	Reducir las importaciones para lograr una independencia energética.
Energéticos	Consumo de Energía final	ktep	Consumo de energía utilizado en diversos sectores (transporte, industrial, agricultura, domestico, servicios) para conseguir un bien.	Reducir el consumo energético.
	Consumo de Energía Primaria	ktep	Consumo de recursos no renovables y renovables para producción energética	Reducir el consumo de los recursos fósiles
	Energía primaria per cápita	ktep/hab	Consumo de energía primaria (doméstico, servicios, etc) respecto a la población en un año.	Reducir el consumo energético.
Energías renovables	Producción de energía primaria por energías renovables	%	Uso de energías renovables para la producción de energía primaria	Producir un 25% del total de la energía primaria con fuentes renovables.

CAPÍTULO 4. ESCENARIO TENDENCIAL (BAU) DE MÉXICO

En este apartado se analiza detalladamente la matriz energética actual de México, en la cual se muestra como históricamente el país ha estado basado en una producción energética a través de fuentes de origen no renovable (petróleo, gas natural, carbón).

El horizonte temporal para la implementación del escenario tendencial, también llamado BAU (Business as usual) se considera desde el 2020 al 2035. Significando un periodo total de análisis de 15 años en los que se podrá ver cómo evoluciona la transición energética mexicana a través del uso de los indicadores ambientales, socioeconómicos, energéticos y el de energías renovables.

4.1 DESCRIPCIÓN

La siguiente Figura muestra un diagrama con el análisis del escenario energético 2020 de México, considerando los ritmos de crecimiento calculados para cada sector como se menciona en el Capítulo 3.

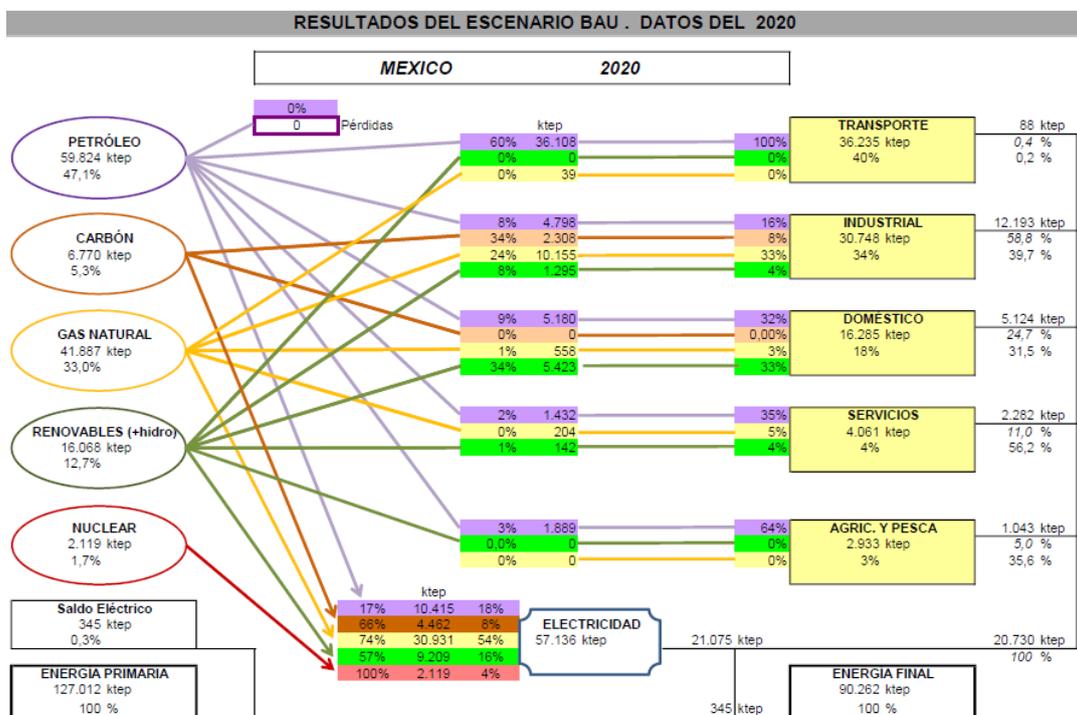


Figura 16: Resultados del Escenario BAU 2020 en México. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

A partir de la Figura 16, se puede entender que México presenta un consumo total de energía primaria de 127.012 ktep para el año 2020. Y que el petróleo es la fuente energética principal del país con 59.824 ktep lo que supone un 47% proveniente del total. La segunda fuente de energía alcanza un 33% representada por el gas natural con 41.887 ktep. Sumando ambos, se puede ver claramente como el 80% de la producción de energía proviene de fuentes no renovables.

Continuando con el análisis de la energía primaria, en tercer lugar, contribuyen las energías renovables con 16.068 ktep, seguido del carbón con 6.770 ktep, finalizando con la energía nuclear en 2.119 ktep.

Se aborda primeramente el análisis al uso del petróleo debido a su gran impacto como fuente de energía. Uno de los puntos claves de este recurso es que el 60% se encuentra destinado únicamente al sector de transporte y tan solo un 16% se utiliza para la generación eléctrica. En este sentido será necesario la aplicación de medidas de sostenibilidad para poder minimizar el consumo de este recurso, logrando así una reducción de emisiones de carbono.

La utilización del gas se encuentra marcado como el principal recurso para la generación de electricidad para el país, ya que se destina un 74% para este objetivo. Por lo que es necesario el incremento de la participación de las energías renovables, como son la eólica y solar para poder hacer cara hacia una transición energética.

Las energías renovables representan una contribución del 12,7% del total de la energía primaria, donde más de la mitad de su utilización es para la generación de electricidad con un 57% de su consumo, y el 34% es destinado hacia el sector doméstico. El 9% restante se divide entre el sector industrial y de servicios.

Respecto al consumo del carbón su mayor uso es para la generación de electricidad, siendo un 66% y un 34% para uso industrial. Tiene sentido que la mayor proporción es destinada para la generación eléctrica debido que México aún cuenta con centrales térmicas de carbón. Sin embargo, es necesario buscar la desaparición de su utilización para el escenario sostenible con el fin de reducir el impacto ambiental que genera la quema del carbón.

El carbón como recurso de generación eléctrica es el más contaminante de todos con un factor de emisión de CO₂ del 5,6 (MtCO₂/Mtep), en comparación con el petróleo que se tiene un valor de 4,0 (MtCO₂/Mtep). Esta información puede ser corroborada en la Tabla 3 del capítulo 3 en este mismo trabajo académico.

Es interesante como el sector de la agricultura y pesca presenta solamente consumos de petróleo, en un 64%. Por lo que se entiende que es un sector que depende por completo de este recurso y a la vez se presenta como una posible oportunidad de mejora para la transición energética.

Finalizando con el análisis de los datos más relevantes, México presenta un saldo eléctrico de 345 ktep. Se refiere que 0,3% de su energía eléctrica proviene del extranjero. Esto en términos generales es un punto positivo a la matriz energética, sin embargo, con la implementación de energías renovables se busca lograr una reducción en ese indicador.

4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

La matriz energética mexicana se ha establecido a partir del análisis proveniente de las siguientes hipótesis:

- Incremento de la demanda de energía eléctrica proveniente de los ritmos de crecimiento de los datos desde 1990 hasta el 2020.
- La generación de electricidad mantiene un rendimiento medio de generación deducido de los datos del 2020, siendo un 35,68%
- Se mantienen constante a largo del periodo los porcentajes de contribución de cada fuente al consumo de cada sector de demanda.
- Se mantiene constante la contribución de energía nuclear en el valor del año 2020, debido a la inviabilidad de aumentar la potencia instalada.
- El incremento de demanda que debería aportar la energía nuclear se asigna a gas natural basado en sus políticas energéticas actuales, en las que se enfatiza la utilización de este recurso.

4.3 MEDIDAS A IMPLEMENTAR

Para el planteamiento del escenario tendencial de la situación energética de México se consideran las hipótesis planteadas anteriormente mencionadas.

En este escenario se omite la implementación de medidas de sostenibilidad con el objetivo de obtener un escenario claro en donde los indicadores sean capaces de determinar la correcta aplicación de las medidas en el futuro escenario sostenible.

4.4 MÉTODO DE CÁLCULO (EXCEL)

Para la realización de la hoja de cálculo es fundamental la utilización de los ritmos de variación de la demanda, los cuales son mencionados en la Tabla 4 del capítulo 3. Son necesarios para determinar el crecimiento total para cada área (población, PIB, Industria, transporte, servicios, doméstico y agricultura y pesca).

La fórmula que se utiliza para la realización del cálculo es la siguiente:

$\text{Crecimiento total} = \text{potencia}(1 + \text{ritmo anual de crecimiento del sector} / 100 ; \text{año de análisis} - \text{año anterior del análisis})$

A continuación, se sustituye la fórmula para obtener el crecimiento total para la población en el año 2023:

$$\text{Crecimiento total} = \text{potencia}(1 + 1,4 / 100 ; 2023 - 2021) = 1,028 \%$$

Para obtener el total de la población se utiliza la siguiente fórmula:

$\text{Total de la población} = \text{Total de la población del año anterior del análisis} * \text{crecimiento total del año de análisis}$

Se sustituye la fórmula para obtener el total de la población para el año 2023:

$$\text{Total de la población} = 127,76 * 1,028 = 131,365 \text{ Mhab}$$

Considerando el ejemplo anterior se realiza de la misma manera para todos los sectores, por lo que los resultados en la hoja de cálculo se muestran de la siguiente manera:

AÑO	2023							
		<i>Población</i>	<i>PIB</i>	<i>Industria</i>	<i>Transporte</i>	<i>Servicios</i>	<i>Doméstico</i>	<i>Agric.y pesca</i>
<i>Ritmo anual crecimiento</i>		1,4	2,4	1,1	2,0	1,6	0,4	1,7
<i>Total crecimiento para el periodo</i>		1,028	1,049	1,022	1,040	1,032	1,008	1,034
<i>Total</i>		131,365	1237,50	31.774	38.453	4.259	16.481	3.085

Figura 17: Ejemplo de la aplicación de los ritmos de crecimiento en el 2023. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

Conociendo los valores totales de crecimiento para el periodo es posible obtener la demanda energética proveniente de cada sector debido a que se aplica la hipótesis de que se mantendrán los porcentajes de contribución de cada fuente al consumo de cada sector de demanda.

Por lo que a continuación, en la hoja de cálculo se representan los valores del consumo energético en la siguiente figura.

SECTOR		CONTRIBUCIÓN (ktep)						Total	%
		Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear		
Industria	ktep	12.599	2.385	4.958	10.494	1.338	0	31.774	34
	%	40	8	16	33	4	0		
Transporte	ktep	93	0	38.319	41	0	0	38.453	41
	%	0	0	100	0	0	0		
Servicio	ktep	2.393	0	1.502	214	149	0	4.259	5
	%	56	0	35	5	4	0		
Doméstico	ktep	5.186	0	5.242	564	5.488	0	16.481	18
	%	31	0	32	3	33	0		
Agric.y Pesca	ktep	1.098	0	1.987	0	0	0	3.085	3
	%	36	0	64	0	0	0		
Gen. Electricidad	ktep		4.602	10.742	31.968	9.497	2.119	58.927	
	%		8	18	54	16	4		
Total fuente	ktep	21.370	6.986	62.751	43.281	16.472	2.119		
Saldo eléctrico	ktep	345							
Electricidad generada	ktep	21.025							
Total E. Primaria	ktep							131.954	
	%								
Total E Final	ktep							94.052	

Figura 18: Consumos energéticos (ktep y %) de México en el año 2023. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

La Figura 18 muestra el consumo energético de cada sector por el tipo de fuente en ktep (kilo toneladas equivalentes de petróleo) durante el año 2023. Para fines de un claro entendimiento de la Figura 18, se analizan los datos más relevantes con el fin de exponer el origen del presente cálculo. En este sentido, se decide explicar el sector de industria.

Para el sector de industria muestra un consumo de electricidad en 40%, de carbón un 8%, petróleo un 16%, de gas natural un 33% y por último un 4% de energías renovables. Sumando los porcentajes de contribución se obtiene un 100%. Estos porcentajes de consumo provienen del consumo energético del 2020, y como se ha mencionado anteriormente estos porcentajes serán constantes durante todo el periodo de análisis (2020-2035) de acuerdo con las hipótesis utilizadas para el desarrollo del escenario BAU.

Considerando esto, se realiza el siguiente cálculo para convertir el porcentaje en ktep:

$$\text{ktep} = \text{total} * \text{porcentaje de contribución} / 100$$

Con el fin de ejemplificar el origen del cálculo, se sustituye la fórmula anterior obteniendo:

$$\text{ktep} = 31.774 * 40\% / 100 = 12.599 \text{ ktep}$$

Recordando que el valor de 31.774 proviene de la tabla 4, en donde se muestran los valores totales de crecimiento.

La obtención de la contribución de los ktep de los sectores restantes es obtenida de la misma manera con la aplicación de las fórmulas anteriormente mencionadas.

Referente al valor de total fuente (ktep) se entiende como la sumatoria de todos los consumos de cada recurso, donde al final se suman y se obtiene un total de 21.370 ktep. Sin embargo, se presenta un saldo eléctrico de 345 ktep como energía importada, significando que esta energía consumida en México no fue producida en el territorio.

Es necesario restar este valor de saldo eléctrico debido a que como es energía proveniente del extranjero, las emisiones de carbono son omitidas. Por lo que al final la electricidad generada presenta una contribución total de 21.025 ktep.

A continuación, se explica el origen y la aplicación de las hipótesis del saldo eléctrico y de la contribución de la energía nuclear para la hoja de cálculo.

- Saldo eléctrico

Para la obtención de los datos del saldo eléctrico son generados a partir de la información de la Agencia Internacional de Energía. (International Energy Agency, 2022)

Los datos se pueden ver representados en la hoja de cálculo de la siguiente manera:

ktep	Electricidad	Calor	TOTAL
Producción	0	0	148054,645
Importación	857	0	102443,683
Exportación	-512	0	-69665,3212
Bunkers Marinos Internacionales	0	0	-156,603774
Bunkers Aviáticos internacionales	0	0	-1944,0172
Modificaciones de Stock	0	0	-1836,11177

Figura 19: Energía importada y exportada en México (ktep) en 2020. Fuente: (International Energy Agency, 2022)

A partir de la Figura 19, se puede entender como México presenta una importación de electricidad por 857 ktep y una exportación de -512 ktep. Estos valores permiten obtener el saldo eléctrico realizando el siguiente cálculo:

$$\text{Saldo eléctrico} = \text{importación} + \text{exportación}$$

Se sustituye la fórmula para obtener el resultado, siendo:

$$\text{Saldo eléctrico} = 857 + (-512) = 345 \text{ ktep}$$

Entonces, se entiende que México es un país que importa más energía eléctrica de la que exporta. Asimismo, es importante aclarar que este resultado es una hipótesis planteada para todo el periodo de análisis del escenario tendencial. Es decir, durante el estudio se mantendrá el planteamiento de que México seguirá consumiendo energía del extranjero.

- Contribución de la Energía Nuclear

Para conocer la cantidad de energía proveniente de la planta de generación nuclear se recolectan los datos de la Agencia Internacional de Energía.

Para aplicar la hipótesis propuesta sobre la contribución de la energía nuclear en México, los datos se pueden ver representados en la hoja de cálculo de la siguiente manera:

ktep	Nuclear
Transferencias	0
Diferencias Estadísticas	0
Plantas Gener Electricidad	-2 119
Plantas de Cogeneración	0
Plantas Gener Calor	0

Figura 20: Contribución de Energía nuclear en México 2020. Fuente: (International Energy Agency, 2022)

De acuerdo con la información de la Figura 20, se puede comprender como la energía nuclear contribuye con un valor de 2.119 ktep en México. Referente a las hipótesis establecidas para el ámbito nuclear, se tienen las siguientes: 1) Se mantiene constante la contribución de energía nuclear en el valor del año 2020, debido a la inviabilidad de aumentar la potencia instalada. Y la 2) el incremento de demanda que debería aportar la energía nuclear se asigna a gas natural.

Para comenzar con la aplicación de la primera, se realiza manteniendo el mismo valor de contribución por 2.119 ktep durante todo el periodo del estudio desde el 2020 hasta el 2035.

Para aplicar la segunda hipótesis en la hoja de cálculo se realiza la siguiente fórmula:

$$\text{Gas natural} = \text{Consumo total} - \sum \text{contribución ktep de las energías (carbón, petróleo, renovables y nuclear)}$$

Se sustituye la fórmula para obtener el resultado del año 2023, siendo:

$$\text{Gas natural} = 58.927 - (4.602 + 10.742 + 9.497 + 2.119) = 31.968 \text{ ktep}$$

4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El estudio de los resultados obtenido durante el desarrollo del escenario BAU son presentados a través del entendimiento de los indicadores debido a que representan cuantitativamente los cambios de las diversas variables con el fin de poder tomar decisiones correctas para mejorar estos resultados. En este apartado se muestran los resultados para los indicadores ambientales, socioeconómicos, energéticos y de renovables.

- Ambientales

Para comenzar se muestran las siguientes gráficas donde se es capaz de visualizar de manera general variaciones en los indicadores ambientales para el periodo de análisis 2020-2035.

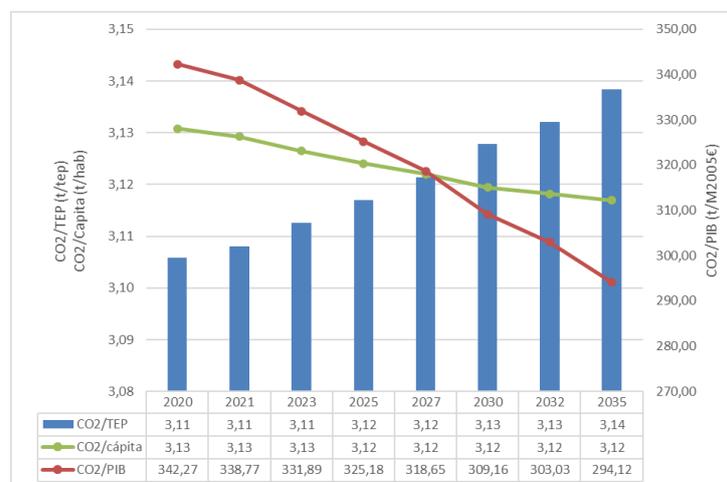


Figura 21: Evolución de los Indicadores ambientales en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Figura 21, el indicador de emisiones de carbono en relación con el PIB refleja una tendencia hacia la disminución, donde se tiene un valor 342,27 t/M2005€ para el 2020 y que para el 2035 presenta un valor de 294,12 t/M2005€. Este comportamiento puede suceder debido a la implementación de políticas ambientales más estrictas en términos de regulación de las emisiones de carbono, así como también un cambio en la estructura económica en donde los sectores presentan menos emisiones como de servicios o de tecnología.

Para la situación del indicador de CO₂/cápita muestra las emisiones de carbono por persona en México. El escenario BAU presenta valores muy cercanos durante todo el análisis en aproximadamente 3,1 t/hab. Esto significa que tanto el crecimiento poblacional como las emisiones de carbono permanecen en valores constantes.

El indicador de CO₂/TEP muestra un ligero aumento con el paso del tiempo, este valor representa las emisiones de carbono por unidad de energía consumida. Se puede entender que habrá un mayor consumo energético de recursos fósiles y por ende resulta en un incremento de emisiones a la atmosfera.

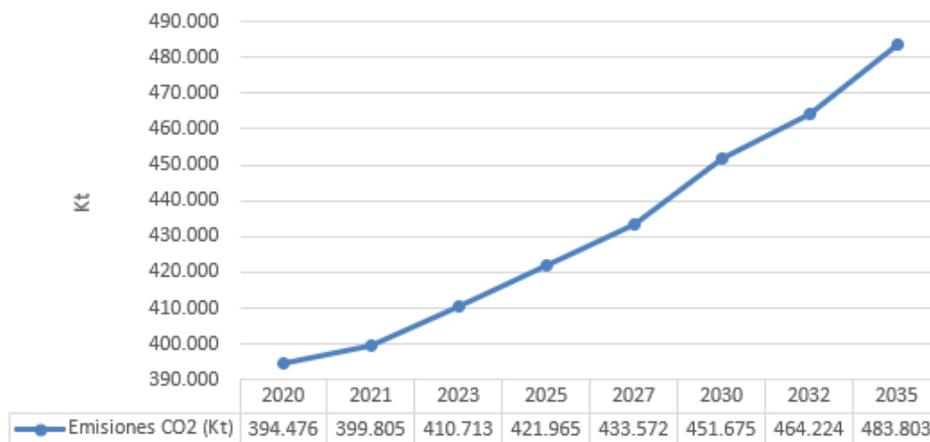


Figura 22: Evolución del indicador de Emisiones de CO₂ en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia

La Figura 22 representa el comportamiento del indicador de emisiones de carbono, el cual marca una tendencia al crecimiento, es decir, las emisiones de carbono van en aumento y que en tan solo 15 años se tendrá un 22% más de emisiones de carbono comparado con el 2020. Sin duda es un indicador en el cual se tienen que implementar medidas de sostenibilidad para buscar una disminución de emisiones.

- Socio-económicos

A continuación, se muestra la siguiente gráfica donde se visualiza de manera general las variaciones en los indicadores socio-económicos para el periodo de análisis 2020-2035.

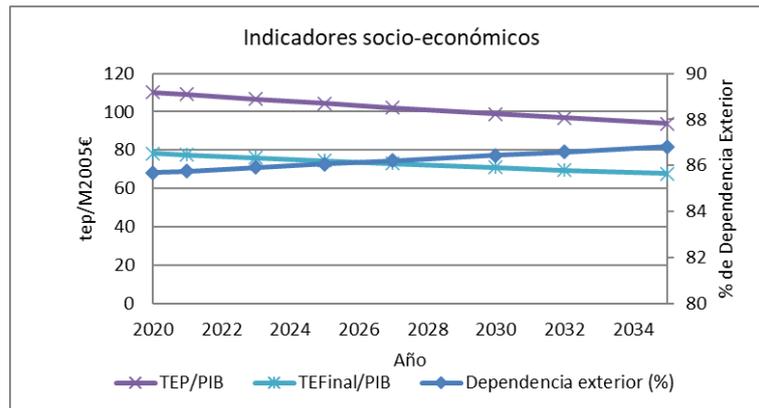


Figura 23: Evolución de los Indicadores socio-económicos en el escenario BAU en el período 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

La Figura 23 muestra la curva de tendencia que presenta México respecto al porcentaje de dependencia exterior que en este caso se mantiene alrededor del 85% durante el periodo de análisis.

México presenta esta alta dependencia porque su matriz energética es mayormente dependiente de los recursos fósiles. En este sentido, se puede mencionar que uno de los recursos más utilizados como el gas natural es proveniente del extranjero. De acuerdo con el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) Estados Unidos provee el 73% de la demanda de gas natural a México. (Ocampo, 2022)

Es importante enfatizar que el gas natural tiene una participación del 54% en materia de generación de electricidad proveniente de su utilización para las centrales de ciclo combinado, y que además se utiliza en el sector industrial y en el doméstico.

Respecto a los indicadores de TEP/PIB, TEFinal/PIB se puede notar como ambos presentan una tendencia similar en la curva debido a que la energía final consumida depende estrechamente de la energía primaria.

El consumo de energía primaria (carbón, petróleo, gas natural, renovables, nuclear) siempre presentará un valor más alto a la energía final debido al rendimiento eléctrico proveniente del proceso de generación de electricidad.

La energía primaria comienza con un consumo de 110,20 tep/M2005€ en el 2020 y para el 2035 alcanza los 93,72 tep/M2005€. Asimismo para la energía final es un consumo de 78,32 tep/M2005€ y finaliza en el 2035 con tan solo 67,61 tep/M2005€. De manera porcentual se puede atribuir en aproximadamente un 15% de disminución para ambos indicadores.

Los indicadores de consumo de energía respecto al PIB muestran una tendencia a la disminución, lo que significa un crecimiento positivo para México respecto a su PIB sin la necesidad de incrementar su consumo energético.

- Energéticos

Para comenzar se muestran las siguientes gráficas donde se es capaz de visualizar de manera general variaciones en los indicadores energéticos para el periodo de análisis 2020-2035.



Figura 24: Evolución de los Indicadores Energéticos en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia

La Figura 24 representa el indicador de TEP/cápita, el cual mantiene un comportamiento similar durante todo el análisis con un valor alrededor de 1 TEP/cápita. El cual significa la relación entre el consumo de energía primaria por persona mexicana.

Respecto al indicador de consumo de energía primaria y de energía final, la Figura 24 muestra la curva de tendencia de como ambas van incrementando con el paso del tiempo.

Como se ha mencionado, tiene sentido que ambas muestren la misma tendencia debido a que energía primaria es básicamente las fuentes energéticas antes de su transformación y la energía final se entiende como aquella que es la ya utilizada por el usuario, como la energía eléctrica, la cual pasa por todo el tema de proceso de conversión antes de llegar al usuario final.

Analizando los valores entre ambos es posible concluir que en un periodo de 15 años se va a aumentar el consumo tanto de energía primaria como de energía final en un aproximado del 20%, por lo que es indispensable aplicar medidas de sostenibilidad con el fin de reducir el consumo energético.

- Energías Renovables

Para comenzar se muestra la siguiente gráfica donde se es capaz de visualizar de manera general variaciones en el indicador de Energías Renovables para el periodo de análisis 2020-2035.

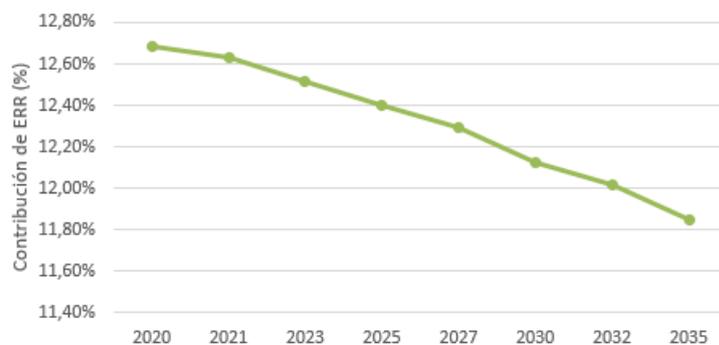


Figura 25: Evolución del indicador de contribución de las Energías Renovables (%) como fuente de Energía primaria en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia

La Figura 25 muestra el comportamiento del indicador de la contribución de energías renovables respecto al total de la demanda de la energía primaria para el escenario BAU.

Se puede observar claramente presenta una tendencia a la baja, en la cual se comienza con un valor de casi el 13% en el 2020, y que en 15 años continuando su tendencia de disminución resultando en un valor de casi 11,80% de contribución para el 2035.

El indicador muestra como es indispensable empoderar las energías renovables en el territorio mexicano para poder lograr una mayor independencia energética y que a su vez contribuya a la disminución de emisiones de carbono.

4.5.1 FUENTES DE ENERGÍA

La matriz energética de México se encuentra compuesta por diversos tipos de recursos energéticos, los cuales son: carbón, petróleo, gas natural, renovables y nuclear.

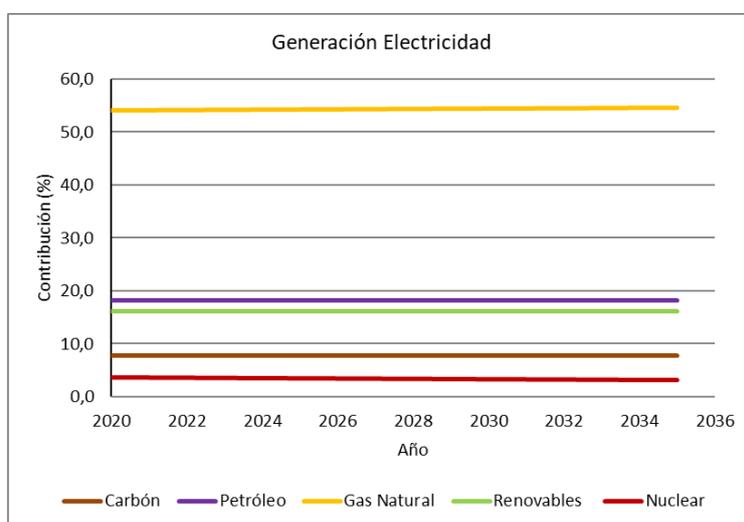


Figura 26: Evolución de la contribución de cada recurso en la generación eléctrica en México en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia

En términos porcentuales la Figura 26 representa la contribución de cada recurso para la generación de electricidad en México.

A partir de las curvas de tendencia, se puede comprender que el gas natural es el recurso fósil más importante para la generación de electricidad en México, contribuyendo en un 54% del total.

Se puede notar como los recursos de carbón, petróleo y renovables mantienen una tendencia estable de contribución debido a la hipótesis planteada en la que se menciona que se van a mantener los mismos porcentajes de contribución proveniente de los recursos.

Por otro lado, para el tema de la energía nuclear se presenta con una pendiente en desaceleración a diferencia de la pendiente del gas natural, la cual muestra un crecimiento. Esto se puede atribuir a la hipótesis planteada para la realización del BAU, donde el porcentaje creciente de la energía nuclear es asignado al gas natural.

4.5.2 SECTORES DE ACTIVIDAD

La siguiente gráfica muestra la relación entre la cantidad de emisiones de carbono provenientes de los diversos sectores (industria, transporte, servicio, doméstico, agricultura y pesca y electricidad) que consumen energéticos en México y por lo tanto emiten CO₂ al medio ambiente.

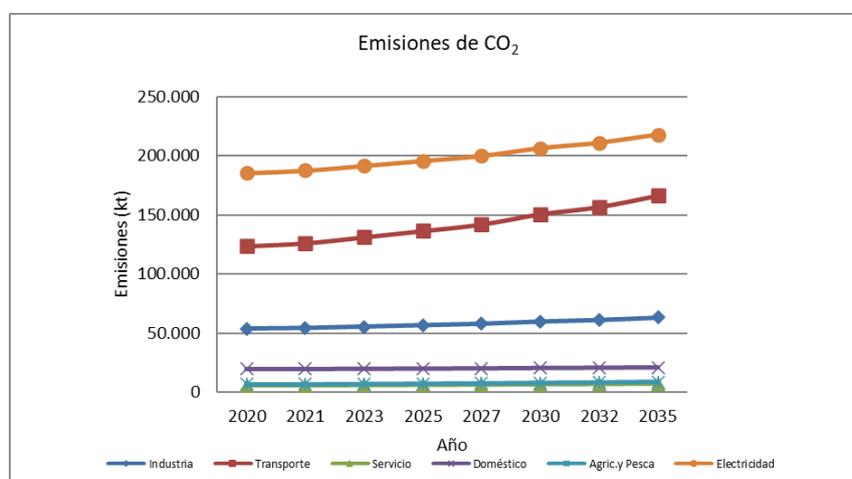


Figura 27: Evolución del indicador de emisiones de carbono proveniente de cada sector en el escenario BAU. Fuente: Elaboración propia

El sector de electricidad y transporte son los sectores que más contribuyen a las emisiones de carbono en el territorio mexicano de acuerdo con los valores mostrados en la Figura 27.

El sector de electricidad en el 2020 emite 185.438 (kt) CO₂, y para el año 2035 aumenta hasta alcanzar casi 217.844 (kt) CO₂, en términos porcentuales se aprecia un incremento de aproximadamente del 17% solo para ese sector para el fin del periodo de estudio.

Por otro lado, es interesante como el sector de transporte es el ámbito con mayor aumento porcentual de casi un 35% durante el periodo de análisis alcanzando emisiones de 166.333 (kt) CO₂ para el 2035. Este incremento en el consumo se presenta debido a la demanda energética que requieren los diferentes medios de transporte, y también puede asumirse que es debido al aumento de transportes con fines privados.

En tercer lugar, se presenta el sector industria con tan solo 53.520 (kt) CO₂ en el 2020 y tiene un ligero aumento que alcanza emisiones de 63.072 (kt) CO₂ para el 2035. Se asume su ligero aumento debido a la reciente pandemia de COVID-19 y las diferentes guerras en el mundo, lo cual ha generado una inestabilidad económica y energética.

El cuarto lugar es alcanzado por el sector doméstico con 19.685 (kt) CO₂, teniendo un aumento de solo el 6%. Se asume el aumento debido al crecimiento de población, que, por ende, resulta en más viviendas.

Finalmente, los sectores de servicio y de agricultura y pesca son los que menos emisiones de carbono realizan con una cantidad de emisiones menor a 9.000 (kt) CO₂ durante todo el periodo de análisis.

4.6 CONCLUSIONES BAU

El estudio del escenario tendencial es esencial para conocer la situación energética del país con el fin de ser capaz de predecir los problemas que podrían suceder en un futuro, y de acuerdo con los resultados obtenidos se procede a evaluar la implementación de posibles soluciones.

La realización del escenario BAU considera datos históricos desde 1990 para poder desarrollar una predicción más acertada basada en su comportamiento tendencial.

A partir de los datos recabados se puede comprender que México presenta un muy alto nivel de dependencia del exterior lo que definitivamente representa un riesgo a su independencia energética. Por esta razón, es importante considerar la implementación de las energías renovables como un camino hacia una mayor independencia energética y asimismo permitir una mejor regulación de costos de la energía eléctrica.

Por otro lado, el territorio sin duda presenta incrementos en sus consumos energéticos afectado mayormente por el crecimiento en el sector del transporte. En este sentido, es necesario implementar medidas para lograr un escenario sostenible con un principal enfoque en alternativas para los medios de transporte.

La proyección futura para México se plantea desalentadora respecto al incremento de las emisiones de carbono. Y es interesante enfatizar como los sectores de generación de electricidad y el del transporte son los que tienen un papel protagonista respecto al crecimiento de los gases de efecto invernadero en México.

Una medida sostenible aplicable para cualquier sector es definitivamente la eficiencia energética. Si se implementa esta medida es posible reducir el consumo energético utilizando correctamente la energía. Existen diversas maneras de realizarlo, que pueden ser a través de la implementación de tecnologías con uso eficiente de energía y/o cambio de hábitos de consumo.

Para hacer frente a la demanda energética por parte del sector transporte se puede plantear la utilización de un combustible alternativo al fósil, transición hacia la movilidad eléctrica o disminuir el uso de los automóviles privados a través de la mejora del transporte público.

Sin duda, la visualización cuantitativa de los indicadores permite la implementación de medidas de sostenibilidad más ajustadas y enfocadas hacia el camino que se quiere seguir. En este estudio, el propósito fundamental es reducir un 13% las emisiones de carbono respecto al escenario tendencial y así como también lograr una mayor penetración de las energías renovables en el territorio mexicano.

CAPÍTULO 5. ESCENARIO SOSTENIBLE

En este apartado se implementan medidas de sostenibilidad en la matriz energética de México enfocadas primordialmente en disminuir la utilización de combustibles fósiles.

El horizonte temporal para la implementación del escenario sostenible se considera desde el 2020 al 2035. Significando un período total de análisis de 15 años en los que se expone la transición energética mexicana. Sin embargo, las medidas implementadas son planteadas a partir del año 2023 en el que se considera solamente la apertura de centrales de generación eléctrica por fuentes renovables (eólica y solar) que realmente sucedieron en ese período. Así como también se consideran los autos eléctricos registrados por el INEGI del año 2023.

5.1 DESCRIPCIÓN

El conocer la disponibilidad de tipos de fuentes de energías renovables de México permiten realizar planteamientos de acuerdo con la perspectiva política y energética en la que se encuentra el territorio. A partir de esta información, es posible encaminar al territorio hacia una transición energética donde las energías limpias se convierten en la parte fundamental para un desarrollo sostenible de México.

Esto es posible debido a que el país tiene una ubicación que puede ser fácilmente utilizada para la implementación de la energía eólica y solar porque presenta altas radiaciones solares y fuertes vientos. En la siguiente sección se abordan las hipótesis realizadas de manera general.

5.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

Las hipótesis planteadas para la realización del escenario sostenible son las siguientes:

- Incremento de la demanda de energía eléctrica derivado de los ritmos de crecimiento desde 1990 al 2020.
- La generación de electricidad mantiene un rendimiento medio de generación deducido de los datos del 2020, siendo de un 35,68%

Asimismo, se considera la aplicación de las siguientes medidas de sostenibilidad:

- Se presenta una variación de los porcentajes de contribución de los recursos de energías renovables, carbón, gas natural y nuclear para el sector de generación de electricidad proveniente de la implementación de las medidas de sostenibilidad.
- Se aumenta la contribución de energía nuclear a partir del año 2032, debido a la posibilidad de aumentar la potencia instalada por medio de la implementación de tres reactores ABWR siendo un total de 4.050 MW para el fin del período de análisis en 2035.
- Sustitución progresiva del uso de carbón para generación eléctrica comenzando en el año 2025 y finalizando en el 2027.

- Se plantea la transición hacia la electromovilidad desde el año 2023 al 2035 donde se busca una sustitución de coches de combustibles fósiles por eléctricos.
- Se impulsa la generación eléctrica a partir de energías renovables como son la eólica y solar durante todo el periodo de análisis.
- Desarrollo y mejora de las centrales hidroeléctrica con el fin de aumentar su potencia instalada a partir del 2025.
- Se considera el inicio de la energía eólica offshore en México en el 2032.

5.3 MEDIDAS A IMPLEMENTAR

Las medidas de sostenibilidad aplicadas al territorio mexicano se conforman por la expansión de la energía hidroeléctrica debido a que el recurso hídrico representa el más utilizado en términos de generación de electricidad de manera renovable en el país.

Seguidamente, se consigue la propagación de la energía fotovoltaica y eólica alrededor del país donde debido a su estratégica posición en el mundo es capaz de utilizar el recurso del sol y del viento de manera bondadosa.

Por otro lado, se considera el incremento de la energía nuclear porque es un recurso que permite tener una seguridad energética y sin emisiones de carbono para el país. En el sentido de disminuir las emisiones de CO₂ se considera el retiro progresivo de las centrales de carbón que aún se encuentran funcionando en el país, asimismo, se determina una transición hacia la electromovilidad en la que los coches con combustibles fósiles son sustituidos por coches eléctricos. Por lo que a continuación, se describe detalladamente cada medida expuesta.

5.3.1 Medida 1: Incremento de la energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica es la principal proveedora de energía limpia en México, por lo que es esencial su mejora para que siga incrementando su suministro de energías renovables. Se presenta una línea del tiempo para poder visualizar detalladamente el desarrollo de la energía hidroeléctrica en el territorio mexicano durante el período del desarrollo del trabajo académico.

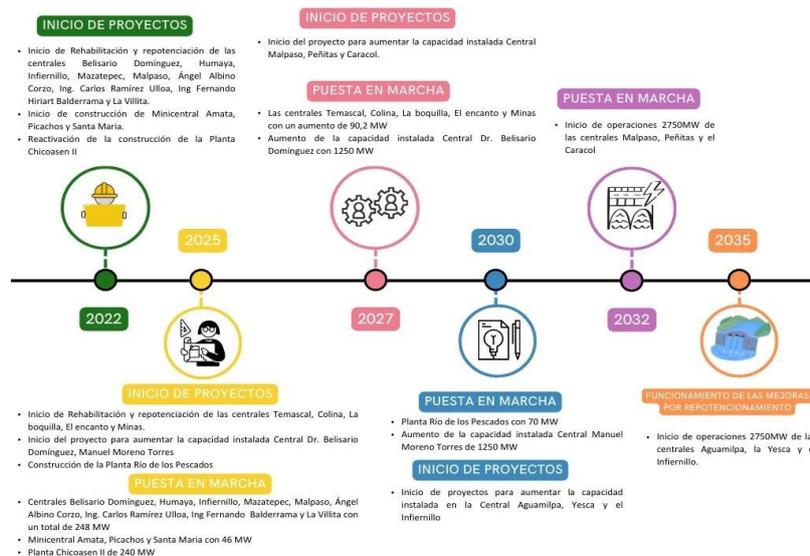


Figura 28: Línea del tiempo del desarrollo de la Energía hidroeléctrica del 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla cada medida referente al incremento de la energía hidráulica en México durante el período de proyección 2020-2035.

Es de vital importancia tomar en consideración que las medidas hidroeléctricas comprenden la implementación de turbinas y de mejoras de acuerdo con la compañía ANDRITZ debido a que ha realizado proyectos internacionalmente para soluciones específicamente en el área de hidroeléctricas.

Se realiza el reemplazo de las turbinas que son del modelo Francis unidas por el mismo eje en tándem y de los generadores eléctricos hacia una utilización de turbinas tipo Francis vertical.

Rehabilitación y repotenciación de Centrales hidroeléctricas para el 2025

La administración de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) aprobó el Plan Integral de Modernización de Centrales Hidroeléctricas por medio de un acuerdo CA-041/2021. En esta resolución se contemplan diversas acciones, entre ellas la rehabilitación, modernización y repotenciación de nueve plantas hidroeléctricas, esto debido a que tienen una antigüedad mayor a los 44 años, y en algunos casos, hasta 70 años de antigüedad. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2022)

A nivel mundial, las renovaciones de una central hidroeléctrica representan toda una oportunidad para incrementar la capacidad de energías renovables en el territorio. Lo que definitivamente tiene un impacto directo en la disminución de emisiones de carbono y también una reducción significativa de costos, ya que se evita la construcción de nuevos embalses o plantas. Adicionalmente, se posibilita la adecuación de las centrales permitiendo extender su vida útil, incrementando su flexibilidad, capacidad y confiabilidad. (Ubierna & Alarcon, 2022)

Las centrales en las que se plantea esta actualización son las siguientes: Belisario Domínguez (Angostura), Humaya, Infiernillo, Mazatepec, Malpaso, Ángel Albino Corzo (Peñitas), Ing. Carlos Ramírez Ulloa (El Caracol), Ing Fernando Hiriart Balderrama (Zimapán) y La Villita.

En la Figura 29 se pueden analizar los documentos de licitación con las posibles mejoras planteadas para incrementar la generación hidroeléctrica a partir del 2025.

Tipo de central	Nombre en documentos de licitación	Factor de planta 2012-2019	Generación media anual total (GWh)	Capacidad existente (MW)	Adición de capacidad (MW)	Unidades	Unidades nuevas	Información importante reportada
Embalse	Belisario Domínguez (Angostura)	27.72%	2,185	900	100	5 (180)	5 (200)	
Embalse	Ing. Carlos Ramírez Ulloa (El caracol)			600		3 (200)	3 (¿27)	Cambio de generadores
Embalse	Humaya			90			1 (55.6)	Cambio de generadores
Embalse	Infiernillo		3,409	1,200	22	6(200)	2 (211)	Mejora de eficiencia (rehabilitación de 2 unidades)
Embalse	La Villita o Villita (José María Morelos)		1,381	320	24	4(80)	4(86)	Repotenciación de 4 generadores
Embalse	Malpaso	32.17%	3,642	1,080	72	6(180)	6(192)	
Hilo de agua	Mazatepec	27.72%	640	220	24	4(55)	4(61)	
Embalse	Peñitas			420	4	4 (???)		Cambio de generadores
Embalse	Ing. Fernando Hiriart Balderrama (Zimapán)			292	2	2(146)		Cambio de generadores
	Total		11,257	5,122	248			

Figura 29: Documentos de Licitación de las mejoras en las plantas hidroeléctricas. Fuente: (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2022)

Con la Figura 29 se puede concluir que las mejoras incluyen cambio de generadores, unidades nuevas, rehabilitación y repotenciación de las centrales hidroeléctricas. Por lo que, la actual medida consta de una adición de capacidad de 248 MW a partir del año 2025.

Funcionamiento de plantas hidroeléctricas para el 2025

Una alternativa hacia la transición energética en México es, sin duda, el seguir construyendo plantas hidroeléctricas debido a su oportuna ubicación geográfica y disponibilidad del recurso hídrico.

En la siguiente tabla se muestran las aperturas de las nuevas plantas hidroeléctricas con un horizonte temporal a partir del año 2025-2035.

Tabla 6: Plantas hidroeléctricas para puesta en marcha en el 2025. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)
Chiapas	Chicoasen II	240
Sinaloa	Minicentral hidroeléctrica Amata	10
Sinaloa	Minicentral hidroeléctrica Presa Picachos	6
Sinaloa	Minicentral hidroeléctrica Santa María	30
Total		286

A continuación, se explica detalladamente acerca del origen e implementación de la futura medida de sostenibilidad en cada planta hidroeléctrica.

1. Chicoasen II

El proyecto de la apertura de la planta Hidroeléctrica Chicoasen II tenía previsto la construcción desde el año 2015, que fue cuando la Comisión Federal de Electricidad (CFE) aprobó la licitación de esa central con un costo de inversión de 386,4 MDD. Sin embargo, por cuestiones políticas el proyecto se canceló en el 2017, siendo que ya contaba con un avance de construcción.

Durante el año 2021, la CFE llegó a un acuerdo con las empresas implicadas para poder continuar con la construcción. Dando como resultado que actualmente la apertura de la central forma parte del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) proveniente de la SENER (Secretaría de Energía). La planta hidroeléctrica Chicoasen II es una extensión de la ya existente planta Chicoasen I, y se encuentran ubicadas en Chiapas, México. (Secretaría de Energía, 2019)

El proyecto consta de la instalación de tres unidades con una capacidad de 80 MW cada una, sumando una capacidad total de 240 MW.



Figura 30: Infraestructura actual de la Central Chicoasen II. Fuente: (Anónimo, 2023)



Figura 31: Ubicación de la Central Chicoasen II. Fuente: Elaboración propia

2. Minicentral hidroeléctrica Amata

Otra alternativa viable es la implementación de equipo hidroeléctrico en la Presa Reguladora Amata, localizada en Cosalá, Sinaloa. La Presa Amata tiene una ubicación adecuada para proveer energía eléctrica a la región del noroeste del país, aprovechando los escurrimientos del río San Lorenzo.

Actualmente existe una Presa Reguladora, donde se busca aprovechar la infraestructura existente para integrar obra civil e implementaciones electromecánicas para producir energía eléctrica.

La actual medida incluye una capacidad total de 10 MW. Este aporte es elegido debido a que el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía hace mención que para ser calificada como una minicentral hidroeléctrica la capacidad máxima es de 10 MW. También se considera que es tan solo es una mejora en una pequeña presa, por lo que el proyecto es acorde a su extensión territorial. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2006)



Figura 32: Ubicación Minicentral Hidroeléctrica Amata. Fuente: Elaboración propia

3. Minicentral hidroeléctrica Presa Picachos

La Presa Picachos se localiza en el sur del estado de Sinaloa sobre la cuenca del río presidio en el municipio de Mazatlán. El embalse almacena 580 millones de metros cúbicos en su totalidad.

La propuesta de la realización de la minicentral hidroeléctrica de la Presa Picachos se compone de un generador de 6 MW para ser integrado junto con la construcción de infraestructuras físicas

y la instalación de equipos especializados para que el proyecto sea integrado a la red eléctrica existente, y por lo tanto conseguir la producción de energía limpia proveniente del río Presidio.



Figura 33: Ubicación de la Minicentral Hidroeléctrica Presa Picachos. Fuente: Elaboración propia

4. Central hidroeléctrica Santa María

El proyecto de la presa de Santa María, sobre el río Baluarte en el estado de Sinaloa, está destinada al almacenamiento de los recursos hídricos necesarios para la puesta en riego de una superficie de alrededor de 24,250 ha dentro de los municipios de Rosario y Escuinapa, así como también se busca aprovechar las instalaciones para que funcionen para la generación de energía hidroeléctrica.

En este caso, se propone la implementación de 30 MW de generación por medio del torrente de agua proveniente de uno de los tres túneles. La presa tiene una cortina de 123 metros de alto y 782 metros de largo, con una capacidad de almacenamiento de 9 millones de metros cúbicos.



Figura 34: Infraestructura física de la Presa Santa María. Fuente: (Gobierno de México, 2023)



Figura 35: Ubicación de la Minicentral Hidroeléctrica Presa Santa María. Fuente: Elaboración propia

Repotenciación, rehabilitación y modernización de plantas hidroeléctricas para el 2027.

Como se ha visto anteriormente en los informes de México, el desarrollo de las centrales hidroeléctricas se encuentra actualmente proyectado hacia una modernización en las plantas ya existentes debido a que los equipos en las instalaciones se encuentran muy obsoletos. Lo que ocasiona un declive en la eficiencia de las plantas y por lo tanto una falta de aprovechamiento al recurso por la desactualización de las máquinas, las cuales pueden tener hasta más de 50 años instaladas.

Las mejoras constarán de una rehabilitación y modernización de los equipos auxiliares y de los generadores eléctricos. También se modernizarán las turbinas hidráulicas con el fin de aumentar la eficiencia en el consumo del agua y aumentar la vida útil de las plantas por al menos 25 años más. La propuesta consta de cambios en los devanados de los estatores, paquete magnético, sistema de excitación y devanados de los rotores.

El proyecto propuesto prevé una medida capaz de incrementar la potencia instalada por medio de la actualización de la tecnología utilizada. Asimismo, es capaz de mejorar la eficiencia energética al optimizar la gestión del agua para aprovechar el caudal e incrementar la generación eléctrica por m³ del agua turbinada.

La capacidad de generación eléctrica de las plantas será incrementada por medio del cambio de turbinas. Las propuestas para el incremento de potencia en las plantas hidroeléctricas son mencionadas en la Tabla 7.

Tabla 7: Propuestas para el aumento de potencia instalada en plantas hidroeléctricas para el 2027.
Fuente: Elaboración propia.

Estado	Nombre de la planta	Capacidad existente (MW)	Capacidad añadida (MW)	Capacidad Total (MW)
Oaxaca	Temascal	154	43	197
Chihuahua	Colina	3	3	6
Chihuahua	La boquilla	25	20,2	45,2
Veracruz	El encanto	10	10	20
Veracruz	Minas	15	14	29
Total			90,2	

A continuación, se explica la manera en la que se obtuvo la capacidad añadida:

1. Temascal: La central hidroeléctrica temascal cuenta con 4 unidades, donde cada unidad tiene una capacidad actual de 38,5 MW, obteniendo un total de 154 MW. La propuesta incluye el cambio de dos turbinas capaz de generar 60 MW cada una, obteniendo una capacidad total de 197 MW.
2. La colina: La central Hidroeléctrica Ing. Andrew Weiss se ubica en el municipio de San Francisco de Conchos, Chihuahua. Y es comúnmente conocida como La Colina. La presa fue construida desde 1927, y cuenta con una unidad de 3 MW. De acuerdo con la información del Instituto Mexicano del Agua (IMTA) el factor de la planta es de un 34%. En esta propuesta se busca incrementar al doble la capacidad, es decir, obtener 6 MW a través de la repotenciación de su turbina y al mismo tiempo la modernización de los equipos permitirá mejorar el factor de planta.
3. La boquilla: La central también es conocida por Lago Toronto, su historia de creación data aproximadamente en el año 1915. Tiene 4 unidades de generación con una capacidad instala de 25 MW y un factor de planta del 38%. Se plantea un incremento de potencia a 11,30 MW para cada unidad con el reemplazo de las 4 turbinas. Lo que resulta en una potencia instalada total de 45,2 MW. (García, Bejarano, & Calderón, 2018)

La Figura 36 representa lo que es la ubicación para implementar esta medida a lo largo del Río la antigua. Por lo que al finalizar el 2030, se tendría una contribución de 70 MW provenientes de esta fuente de energía limpia.

Aumento de la capacidad instalada en planta hidroeléctricas

Se considera el aumento de la capacidad instalada en plantas hidroeléctricas ya existentes con el fin de aprovechar las instalaciones actuales a través de proyectos de mejoras para contribuir al aumento de energía hidráulica en el país.

El origen de esta propuesta es debido a que el Gobierno de México se encuentra actualmente impulsando las renovaciones y mejoras mayormente en sus equipos de plantas hidroeléctricas, por lo tanto, se considera que esa medida seguirá expandiéndose para mejorar su matriz energética de manera sostenible y asequible.

En la siguiente tabla, se muestra el nombre de la planta, la capacidad añadida y el inicio de funcionamiento con la modificación de la planta.

Tabla 8: Propuesta de aumento de la capacidad de plantas hidroeléctricas existentes. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)	Inicio de operaciones
Chiapas	Dr. Belisario Domínguez	1.250	2027
Chiapas	Manuel Moreno Torres	1.250	2030
Chiapas	Netzahualcóyotl (Presa Malpaso)	1.250	2032
Chiapas	Angel Albino Corzo (Peñitas)	750	2032
Guerrero	Carlos Ramirez Ulloa (El caracol)	750	2032
Nayarit	Aguamilpa (solidaridad)	1.250	2035
Nayarit, Jalisco	La yesca	500	2035
Guerrero, Michoacán	El infiernillo	1.000	2035
Total		8.000	

Evaluación de la medida implementada: Tecnología Hidroeléctrica

En este apartado se explica detalladamente como se obtiene la evaluación cuantitativa en tema de emisiones de carbono y de incremento de generación eléctrica a través de la implementación de la energía hidroeléctrica en México.

El INECC en su reciente informe 2022 llamado “Reducción de Emisiones Asociadas al Programa de Modernización y Rehabilitación de Centrales Hidroeléctricas en México” considera la aplicación de un factor de planta del 81% (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2022) debido a la estimación de factores desprendidos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y también de organismos internacionales.

La determinación del factor de planta es necesario para la obtención de la capacidad de la planta en MWh, el cual es utilizado en la siguiente fórmula:

$$E_{\text{hidroeléctrica}_i} (\text{MWh}) = \text{Potencia}_i * \text{Factor de capacidad}_i * \text{Horas al año}$$

A manera de ejemplificación se realizan los cálculos para la medida de Rehabilitación y repotenciación de Centrales hidroeléctricas para el 2025.

$$E_{\text{hidroeléctrica}_i} (\text{MWh}) = 248 \text{ MW} * 0,81 * 8760 \text{ horas} = 1759.708,8 \text{ MWh}$$

Para fines prácticos y de utilización de la hoja de cálculo se convierten los MWh a ktep de la siguiente manera. Si se conoce que 1 ktep=41,87 TJ y 1 TJ= 277,78 MWh, se obtienen los siguientes cálculos:

$$E_{\text{producida}} (\text{TJ}) = \frac{1759.708,8 \text{ MWh}}{277,78 \text{ MWh}} = 6334,90 \text{ TJ}$$

$$E_{\text{producida}} (\text{ktep}) = \frac{6334,90 \text{ TJ}}{41,87 \text{ TJ}} = 151,30 \text{ ktep}$$

La obtención del resultado en ktep se utiliza para la disminución de emisiones de carbono referente a la generación de electricidad, dicha variable es utilizada en la hoja de cálculo como se puede observar en el capítulo 9 Anexos.

A partir de las mejoras para el incremento de la energía hidroeléctrica en México se realiza la siguiente tabla con el fin de resumir la obtención de los cálculos para representarlos en la hoja de cálculo.

Tabla 9: Medidas propuestas para mejora de la energía hidroeléctrica en México. Fuente: Elaboración propia

Medida	Adición de capacidad (MW)	Obtención de MWh	ktep	Periodo de proyección
Rehabilitación y repotenciación de Centrales hidroeléctricas para el 2025	248	1759.708,8	151,30	2025-2035
Funcionamiento de plantas hidroeléctricas 2025	286	2029.341,6	174,48	2025-2035
Repotenciación, rehabilitación y modernización de plantas hidroeléctricas para el 2027	90,2	640.023,12	55,03	2027-2035

Funcionamiento de la planta hidroeléctrica Río de los pescados para el 2030	70	496692	42,71	2030-2035
Aumento de la capacidad instalada en plantas hidroeléctricas	8.000	56.764.800	4.880,62	2027-2035
Total	8.694,2	61.690.565,52	5304,14	

Para concluir la medida la energía hidroeléctrica se analiza la Tabla 9, donde se puede observar un incremento total de 8694,2 MW proveniente del recurso del agua, y así como también una disminución total de 5304,14 ktep de reducción de emisiones de carbono gracias al desarrollo de la energía limpia.

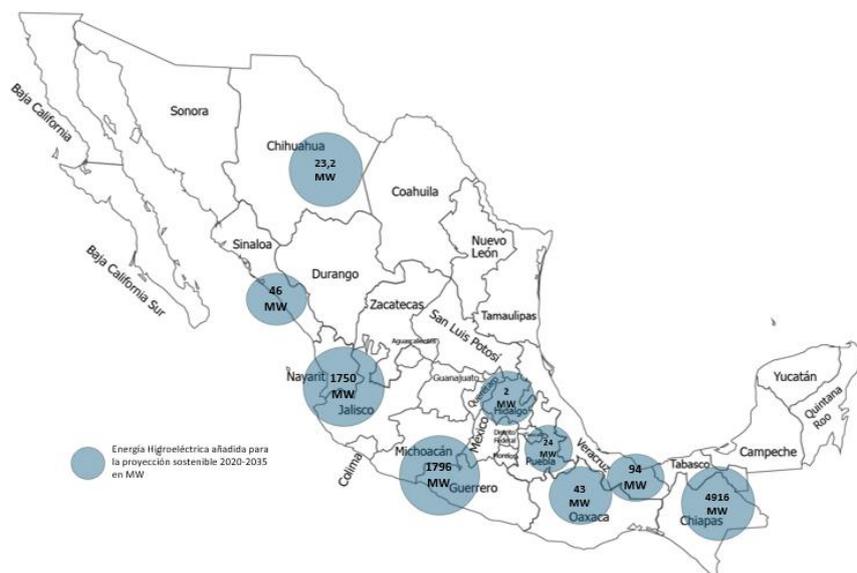


Figura 37: Expansión de la Energía Hidroeléctrica en México 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

Se concluye la implementación de la medida de sostenibilidad con la Figura 37, la cual muestra la expansión de energía hidroeléctrica en cada zona del territorio mexicano.

La proyección determina un aumento de capacidad de energía hidroeléctrica de 8694,2 MW en todo el territorio mexicano, pero con un énfasis especial en la zona sur debido a su capacidad hídrica, esto se deriva de los tipos de climas de México donde el norte es un clima mayormente árido y la zona sur tiende a ser más tropical.

5.3.2 Medida 2: Incremento de la energía fotovoltaica

La utilización de la energía solar es sin duda uno de los mayores protagonistas hacia la proyección de sostenibilidad en el territorio debido a que representa una gran oportunidad para obtener energía limpia a través del sol, el cual es considerado como una fuente de energía inagotable.

Considerando los beneficios de la implementación de este tipo de tecnología en el país, se determina buscar una mayor propagación a lo largo del país. Como se ha mencionado, México

es un país que cuenta con el beneficio de tener una irradiación solar alta en todas las regiones donde se considera un promedio de 5,5 kWh/m² diariamente. (Global solar atlas, 2024)

Para la medida de sostenibilidad de incrementar la energía fotovoltaica se determina la instalación de plantas fotovoltaicas en los estados de Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Guanajuato, Jalisco, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Sinaloa, Sonora, Veracruz, Yucatán y Zacatecas.

Existe especial atención en el estado de Baja California debido a que el sistema de red eléctrica de esta zona es diferente en comparación con otros estados porque cuenta con una red eléctrica aislada de la del resto del país. Por lo que se tiene el propósito de conseguir la independencia de combustibles fósiles y al mismo tiempo generar energía eléctrica de manera limpia para disminuir los costos de energía y reducir las emisiones de carbono. (Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), 2020)

Para la proyección adecuada de la ubicación y capacidad de las plantas solares, se realiza un análisis e investigación acerca de las plantas que se encuentran actualmente en funcionamiento, así como también se consideran las proyecciones gubernamentales en sus planes de desarrollo y permisos actualmente concedidos sobre las regiones para implementar plantas fotovoltaicas.

Se presenta una línea del tiempo para poder visualizar detalladamente el desarrollo de la energía fotovoltaica en el territorio mexicano durante el período del desarrollo del trabajo académico.

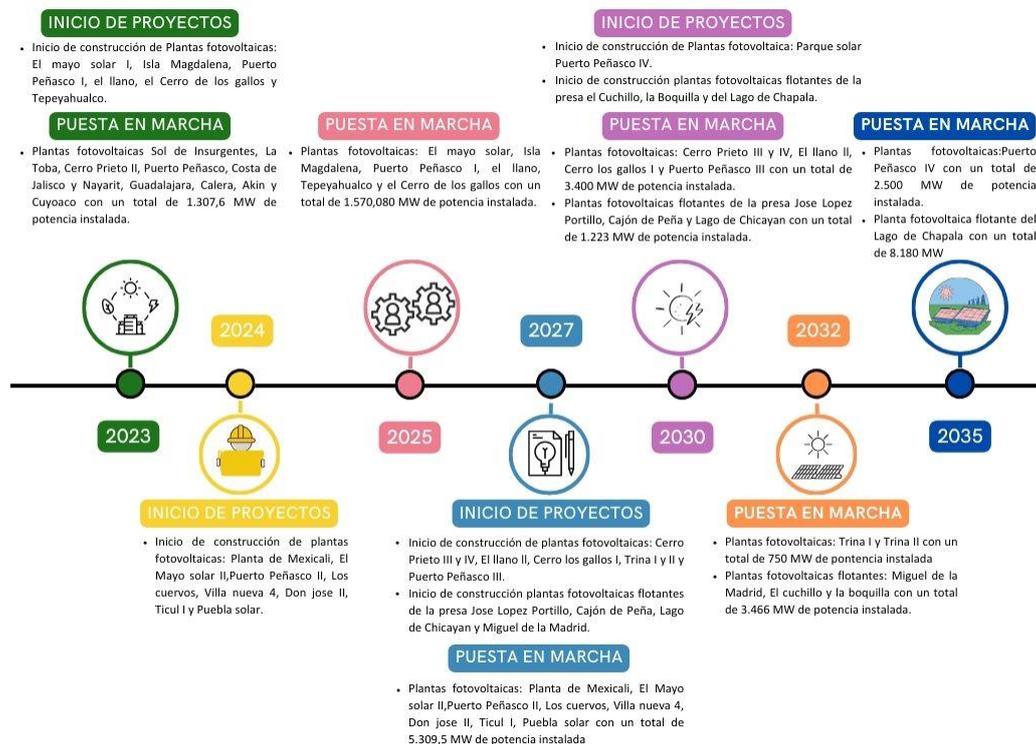


Figura 38: Línea del tiempo del desarrollo de la Energía Fotovoltaica del 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente, la actual medida consiste en la instalación de un total de 32 plantas fotovoltaicas terrestres y 7 plantas fotovoltaicas flotantes por todo México con una diferente eficiencia obtenida a través del uso del dato de Producción anual FV (kWh) por medio del

programa PVGIS. En el programa de PVGIS se selecciona el nombre del estado en cuestión para poder obtener su valor. (PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, 2022)

De acuerdo con la irradiación solar de cada región por cada pico instalado (kWp) se obtiene la siguiente producción de energía anual mostrado en la Tabla 10.

Tabla 10: Coeficientes de producción anual (kWh). Fuente: Elaboración propia con datos de (PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, 2022)

Estado	Coeficiente de producción anual (kWh)
Aguascalientes	1854,41
Baja California	1912,49
Chihuahua	1845,24
Coahuila	1848,96
Guanajuato	1837,7
Jalisco	1758,11
Nuevo León	1570,27
Oaxaca	1753,39
Puebla	1805,46
Sinaloa	1680,04
Sonora	1797,11
Veracruz	1448,29
Yucatán	1535,71
Zacatecas	1927,64

A partir de los datos obtenidos en la tabla es posible obtener los MWh que son producidos en cada región del territorio mexicano derivado del coeficiente de producción anual. El procedimiento para la obtención de la energía producida (MWh) es abordado en la siguiente sección llamada “Evaluación de la medida implementada: Tecnología solar”.

A continuación, la Tabla 11 menciona de manera general sobre la futura proyección de la medida durante el año 2023 y el 2025 como es: el estado (región), nombre de la planta y la capacidad del parque fotovoltaico.

Tabla 11: Proyección de la Energía Fotovoltaica 2023-2025. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)	Obtención de MWh	Inicio de funcionamiento
Baja California	Sol de Insurgentes	35,6	68.084,64	2023
Baja California	La Toba	32	61.199,68	2023
Baja California	Cerro Prieto II	150	286.873,50	2023
Sonora	Puerto Peñasco I	120	215.653,20	2023
Jalisco- Nayarit	Costa de Jalisco y Nayarit	340	597.757,40	2023
Jalisco	Guadalajara	250	439.527,50	2023
Zacatecas	Calera	80	154.211,20	2023
Sonora	Akin	100	179.711,00	2023
Puebla	Cuyoaco	200	361.092,00	2023
Sonora	El mayo solar	244	438.494,84	2025
Baja California	Isla Magdalena	1,08	2065,49	2025
Sonora	Puerto Peñasco I	350	628.988,50	2025
Aguascalientes	El llano	375	695.403,75	2025
Aguascalientes	El cerro de los gallos	400	741.764,00	2025
Puebla	Tepeyahualco	200	361.092,00	2025
Total		2.877,68	5231.918,70	

A partir de Tabla 11 se puede comprender como México presenta un potencial de instalación solar de 2877,68 MW durante el periodo 2023 al 2025 en diversas partes del territorio mexicano. Como se ha mencionado con anterioridad, la ubicación es seleccionada de acuerdo con la visualización de los planes de desarrollo energético a nivel federal y estatal de México, con el propósito de que la ubicación sea lo más acertada posible. Además, casi todo el territorio es favorecido por las radiaciones solares lo que facilita el aprovechamiento de la energía solar.

Considerando las plantas que se encuentran en funcionamiento desde el 2023, se pueden visualizar algunas de ellas en las siguientes figuras.

La Figura 39 muestra la instalación en el parque fotovoltaico Sol de Insurgentes y la Figura 40 representa el parque fotovoltaico La Toba ubicados en el estado de Baja California.

La Figura 41 representa el parque fotovoltaico Puerto Peñasco en Sonora con una capacidad instalada de 120 MW. Y la Figura 42 representa la planta ubicada en Zacatecas, la cual se llama Calera y tiene una capacidad de 80 MW.



Figura 39: Sol de insurgentes en Baja California.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 40: La Toba Baja California. Fuente: Elaboración propia.



Figura 41: Puerto Peñasco Sonora. Fuente: Elaboración propia.



Figura 42: Calera Zacatecas. Fuente: Elaboración propia.

Para el siguiente periodo se realiza una tabla similar para describir las proyecciones de parques solares a partir del 2027 hasta finalizar el análisis del trabajo en el 2035.

Tabla 12: Proyección de la Energía Fotovoltaica 2027-2035. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)	Obtención de MWh	Inicio de funcionamiento
Baja California	Mexicali	2546	4869.199,54	2027
Sonora	Mayo solar II	250	449.277,50	2027
Sonora	Puerto Peñasco II	772	1387.368,92	2027
Coahuila	Los cuervos	385	711.849,60	2027
Coahuila	Villanueva 4	550	1016.928,00	2027
Guanajuato	Don José II	350	643.195,00	2027
Yucatán	Ticul 1	310,5	476.837,96	2027

Puebla	Puebla solar	146	263.597,16	2027
Baja California	Cerro Prieto III	200	382.498,00	2030
Baja California	Cerro Prieto IV	250	478.122,50	2030
Aguascalientes	El llano II	550	1019.925,50	2030
Aguascalientes	El cerro de los gallos	600	1112.646,00	2030
Sonora	Puerto Peñasco II	1800	3234.798,00	2030
Nuevo León	Trina I	300	471.081,00	2032
Nuevo León	Trina II	450	706.621,50	2032
Sonora	Puerto Peñasco III	2500	4492.775,00	2035
Total		11.959,5	21.716.721,18	

A partir de Tabla 12 se puede comprender como México presenta un potencial de instalación solar de 11.959,5 MW durante el periodo 2027 al 2035 en diversas partes del territorio mexicano.

A manera de conclusión, México obtiene una capacidad total de 14.837,18 MW de energía fotovoltaica terrestre durante el período de duración del trabajo académico, es decir, 2020 al 2035.

- Energía fotovoltaica flotante

Otra manera de implementar la energía fotovoltaica es utilizando lo que son embalses, presas o el mismo conjunto hídrico que ya se tiene, en este sentido, se plantea la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes.

De acuerdo con el Centro Mexicano en Innovación de Energía Hidroeléctrica (CEMIE) existen diversas líneas de acción para poder aprovechar el sector hidráulico en materia de energía, en este caso se menciona los sistemas híbridos fotovoltaico-hidroeléctrico. Este tipo de sistema consiste en la instalación de paneles fotovoltaicos en paramentos secos de embalses y cortinas con el fin de aprovechar el espacio. Por lo que a continuación se plantea esta medida de sostenibilidad como una solución viable para zonas aisladas o no electrificadas.

Los estudios de investigación del CEMIE determinaron el potencial de generación fotovoltaica en embalses de las presas. En este caso, se consideran las presas de mayor potencial para la implementación del sistema híbrido, las cuales son: Lago de Chapala, Miguel de la Madrid, El Cuchillo, La Boquilla, Cajón de Peña y Lago de Chicayan.

Una de las diferencias de las instalaciones fotovoltaicas regulares con las plantas solares flotantes es su instalación. En el tema de la estructura el material debe ser uno resistente con una vida útil mayor o igual a la del módulo fotovoltaico (aproximadamente 30 años). Los componentes requeridos son flotadores principales de soporte, flotador secundario, riel de fijación sobre el flotador y el módulo fotovoltaico convencional. (CEMIE, 2018)

Para la correcta selección de las presas que podrían ser receptoras de la energía solar fotovoltaica se consideran apropiadas aquellas que tienen un nulo uso en el área de la

acuicultura y para la determinación del área a ocupar, se realiza la instalación en tan solo un tercio del área total del embalse. Los cálculos del área disponible provienen del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra entre otros datos el área mínima, media y máxima anual de las 180 presas que existen.

El potencial probable se realiza considerando una tecnología fotovoltaica fija, con orientación hacia el sur con un ángulo respecto a la horizontal de la superficie igual a la latitud de su localización. La Capacidad Instalable probable P se calcula a partir del espacio disponible (ha) dividida por la inversa de la densidad de potencia (ha/MW). (CEMIE, 2018)

En este sentido, la siguiente tabla menciona la futura proyección de la medida a partir del año 2030: el estado (región), nombre de la planta y la capacidad del parque fotovoltaico flotante.

Tabla 13: Proyección de la Energía Fotovoltaica flotante 2030-2035. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta solar flotante	Capacidad añadida (MW)	Obtención de MWh	Inicio de funcionamiento
Sinaloa	Presa José López Portillo	337	566.173,48	2030
Jalisco	Cajón de Peña	337	592.483,07	2030
Veracruz	Lago de Chicayan	549	795.111,21	2030
Oaxaca	Miguel de la Madrid	2.200	3857.458,00	2032
Nuevo León	El cuchillo	689	1081.916,03	2032
Chihuahua	La boquilla	577	1064.703,48	2032
Jalisco	Lago de Chapala	8.180	14.381.339,80	2035
Total		12.869	22.339.185,07	

La Tabla 13 muestra las medidas implementadas respecto a los parques solares flotantes en México a partir del periodo 2030 al 2035, resultando en una capacidad instalada de 12.869 MW de energía solar flotante. Es importante considerar que la capacidad instalada (MW) se determina por medio de los cálculos obtenidos del CEMIE. (CEMIE, 2018)



Figura 43: Ubicación planta solar flotante en la presa Miguel de la Madrid. Fuente: Elaboración propia



Figura 44: Ubicación planta solar flotante en el Lago de Chapala. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 43 y 44 representa la ubicación de donde se implementaría la energía fotovoltaica flotante, en este caso se tiene en la presa Miguel de la Madrid y el Lago de Chapala, respectivamente.

Se muestran las ubicaciones debido a la importancia estratégica de su instalación, considerando que son los espacios más amplios en tema de implementación del sistema híbrido. En la presa se considera una capacidad de 2.200 MW y en el Lago 8.180 MW de potencia instalada, siendo estas las más grandes plantas solares flotantes para México.

Evaluación de la medida implementada: Tecnología Solar

En este apartado se explica detalladamente como se obtiene la evaluación cuantitativa en tema de emisiones de carbono y de incremento de generación eléctrica a través de la implementación de la energía solar en México.

Primeramente, se consideran los datos de PVGIS (PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, 2022) el coeficiente de producción anual FV (kWh) de las distintas zonas de México donde se instalan los respectivos parques fotovoltaicos mostrados en la Tabla 10.

Para poder obtener la capacidad de la planta en MWh, se utiliza la siguiente fórmula:

$$E_{\text{Solar}_i} (\text{MWh}) = \text{Potencia}_i * \text{Coeficiente de producción anual del estado}_i (\text{kWh})$$

A manera de ejemplificación se realizan los cálculos para la medida de la proyección de la energía solar flotante 2030-2035 Presa de Jalisco Lago de Chapala descrita en la Tabla 13.

$$E_{\text{Solar}_i} (\text{MWh}) = \frac{8180000 \text{ kW} * 1758,11}{1000} = 14.381.339,8 \text{ MWh}$$

Para fines prácticos y de utilización de la hoja de cálculo se convierten los MWh a ktep de la siguiente manera. Si se conoce que 1 ktep=41,87 TJ y 1 TJ= 277,78 MWh, se obtienen los siguientes cálculos:

$$E_{\text{producida}} (\text{TJ}) = \frac{14.381.339,8 \text{ MWh}}{277,78 \text{ MWh}} = 51.772,40 \text{ TJ}$$

$$E_{\text{producida}} (\text{ktep}) = \frac{51.772,40 \text{ TJ}}{41,87 \text{ TJ}} = 1236,50 \text{ ktep}$$

La obtención del resultado en ktep se utiliza para la disminución de emisiones de carbono referente a la generación de electricidad, dicha variable es utilizada en la hoja de cálculo como se puede observar en el capítulo 9 Anexos.

A partir de las mejoras para el incremento de la energía solar en México se realiza la siguiente tabla con el fin de resumir la obtención de los cálculos para representarlos en la hoja de cálculo.

Tabla 14: Implementación de Energía fotovoltaica total en México. Fuente: Elaboración propia

Medida	Adición de capacidad (MW)	Obtención de MWh	ktep	Periodo de proyección
Parques fotovoltaicos 2023-2025	2.877,68	5231.918,70	449,84	2023-2025
Parques fotovoltaicos 2026-2035	11.959,50	21.716.721,18	1867,20	2026-2035
Parques fotovoltaicos flotantes	12.869,00	22.339.185,07	1920,72	2030-2035
Total	27.706,18	49.287.824,95	4237,75	

Para concluir la medida solar a implementar se analiza la tabla 14, donde se puede observar un incremento total de 27.706,18 MW por energía solar, y así como también una disminución total de 4237,75 ktep de reducción de emisiones de carbono gracias al desarrollo de energía fotovoltaica. Se concluye la implementación de la medida solar con la Figura 45, la cual muestra el potencial de energía fotovoltaica en cada zona del territorio mexicano.



Figura 45: Expansión de la Energía Fotovoltaica en México 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

La proyección determina un aumento de capacidad de energía solar de 27.706,18 MW en todo el territorio mexicano, pero con un énfasis especial en la zona norte debido a su capacidad solar, esto se deriva de los tipos de climas de México donde el norte es un clima mayormente árido y recibe mayores radiaciones solares.

5.3.3 Medida 3: Incremento de Energía Eólica

El desarrollo de la energía eólica se considera como una tecnología madura, y por lo tanto es capaz de brindar una seguridad energética al país, además que es considerada como una energía limpia por el hecho de aprovechar el recurso del viento tanto de día como de noche sin generar emisiones de carbono.

Se presenta una línea del tiempo para poder visualizar detalladamente el desarrollo de la energía eólica en el territorio mexicano durante el período del desarrollo del trabajo académico.

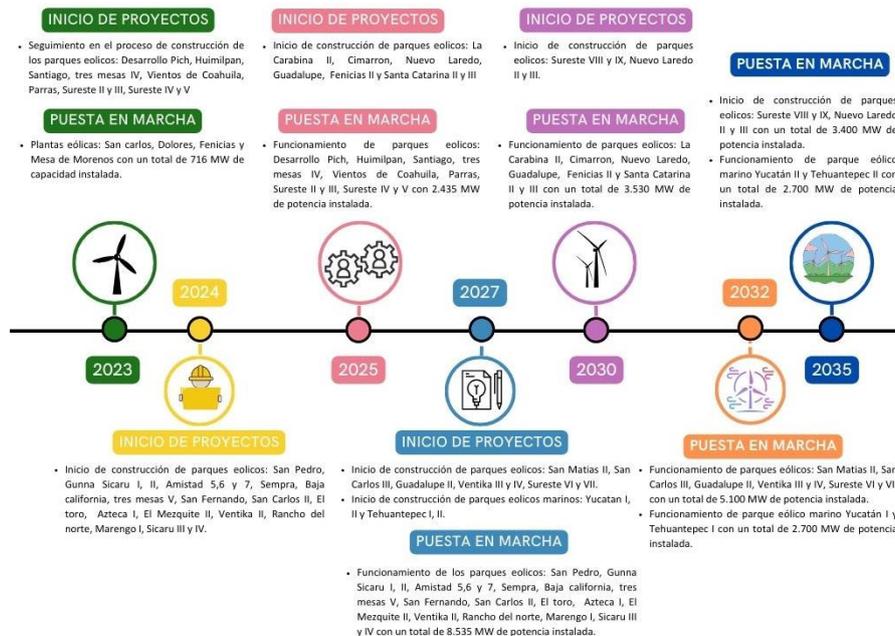


Figura 46: Línea del tiempo del desarrollo de la Energía Eólica del 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

A través de la Figura 46, se puede entender que la actual medida consiste en la instalación de un total de 49 plantas eólicas terrestres y 4 plantas eólicas marinas por todo México.

Es interesante considerar que la medida consiste en la implementación de parques en diferentes zonas de México por lo que el recurso del viento cambia dependiendo la zona. En este sentido, se considera un factor de planta de acuerdo con la ubicación de la instalación.

La Asociación Nacional de Energía Solar en México ha determinado el factor de planta promedio para los parques eólicos proveniente de información meteorológica consignada por la Red de Observatorios del Servicio Meteorológico Nacional, así como información de mediciones con fines eoloenergéticas y de las simulaciones de generación eléctrica con aerogeneradores modernos. Los factores de planta obtenidos se muestran en la Tabla 15. (E. C. , 2006)

Tabla 15: Factores de Plantas eólicas México. Fuente: Elaboración propia con datos de (E. C. , 2006)

Región	Factor de planta estimado
Centro Norte	0,30
Área Central	0,29

Istmo de Tehuantepec	0,45
Costa de Quintana Roo	0,29
Norte de Baja California	0,31

La Tabla 15 representa los factores de planta de México, se puede observar como el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca mantiene un alto nivel de funcionamiento para sus parques eólicos, y el nivel más bajo es un 0,29. Entonces, se podría entender que de manera general México tiene un promedio de 0,32 de factor de planta.

La ubicación de parques eólicos es seleccionada debido a la visualización de los planes de desarrollo energético a nivel federal y estatal de México con el propósito de que la ubicación sea lo más acertada posible. Considerando los factores de planta del territorio, se entiende que es un país favorecido por las ráfagas de viento facilitando la eficiencia de los aerogeneradores.

A continuación, en la Tabla 16 se menciona la futura proyección de la medida durante el período 2023 al 2025 como es: el estado (región), nombre de la planta, la capacidad del parque eólico, factor de planta y su generación neta.

Tabla 16: Proyección de la Energía Eólica 2023-2025. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)	Factor de Planta	Obtención de MWh	Inicio de funcionamiento
Tamaulipas	San Carlos	198	30%	520344	2023
Nuevo León	Dolores	274	30%	720072	2023
Nuevo León	Fenicias	168	30%	441504	2023
Zacatecas	Mesa de Morenos	76	30%	199728	2023
Campeche	Desarrollo Pich	400	30%	1051200	2025
Coahuila	Vientos de Coahuila	154	30%	404712	2025
Coahuila	Parras	50	30%	131400	2025
Guanajuato	Santiago	105	29%	266742	2025
Querétaro	Huimilpan	30	29%	76212	2025
Oaxaca	Sureste II y III	800	45%	3153600	2025
Oaxaca	Sureste IV y V	800	45%	3153600	2025
Tamaulipas	Tres mesas IV	96	30%	252288	2025
Total		3.151		10371402	

A partir de la Tabla 16 se puede comprender como México presenta un potencial de instalación eólica de 3.151 MW durante el periodo 2023 al 2025 en diversas partes del territorio mexicano. Considerando las plantas que se encuentran en funcionamiento desde el 2023, se pueden visualizar algunas de ellas en las siguientes figuras.

La Figura 47 muestra la instalación en el parque eólico Fenicias en el estado de Nuevo León con 168 MW de potencia instalada. Y la Figura 48 representa el parque eólico Dolores en Nuevo León con una capacidad instalada de 274MW.



Figura 47: Parque eólico Fenicias. Fuente: Elaboración propia



Figura 48: Parque eólico Dolores. Fuente: Elaboración propia

Para el siguiente periodo se realiza una tabla similar para describir las proyecciones de parques eólicos que están funcionando para el año 2027.

Tabla 17: Proyección de la Energía Eólica 2027. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)	Factor de Planta	Obtención de MWh
Baja California	Sempra	330	31%	896148
Baja California	Baja California	520	31%	1412112
Campeche	Marengo I	415	29%	1054266
Coahuila	Amistad 5,6,7	1800	30%	4730400
Nuevo León	El Mezquite II	500	30%	1314000
Nuevo León	Ventika II	500	30%	1314000
Nuevo León	Rancho del norte	250	30%	1314000
Oaxaca	Gunna Sicaru I	48	45%	189216
Oaxaca	Gunna Sicaru II	252	45%	993384
Oaxaca	Gunna Sicaru III, IV	1200	45%	4730400
Oaxaca	Azteca I	600	45%	2365200

Querétaro	San Pedro	100	29%	254040
Tamaulipas	Tres mesas V	150	30%	394200
Tamaulipas	San Carlos II	620	30%	1629360
Tamaulipas	San fernando	500	30%	131400
Tamaulipas	El toro	750	30%	1971000
Total		8.535		25218726

A partir de la Tabla 17 se puede comprender como México presenta un potencial de instalación eólica de 8.535 MW durante el año 2027 en diversas partes del territorio mexicano, pero sobre todo en la zona de Oaxaca donde el territorio mexicano se estrecha haciendo que las rachas de viento sean mayores.

Considerando las plantas que se encuentran en funcionamiento a partir del 2027, se pueden visualizar las ubicaciones en las siguientes figuras.



Figura 49: Ubicación propuesta para el parque eólico Marengo I, Campeche. Fuente: Elaboración propia.



Figura 50: Ubicación propuesta para los parques eólicos Amistad 5, 6 y 7, Coahuila. Fuente: Elaboración propia

La Figura 49 muestra la ubicación del próximo parque eólico Marengo I ubicado en Campeche, el cual se encuentra localizado entre las comunidades Paraíso y Moquel. La Figura 50 representa la proyección para la construcción de los próximos parques eólicos Amistad 5, 6 y 7 en Coahuila.

Para el siguiente periodo se realiza una tabla similar para describir las proyecciones de parques eólicos en funcionamiento a partir del 2030.

Tabla 18: Proyección de la Energía Eólica 2030. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)	Factor de Planta	Obtención de MWh	Inicio de funcionamiento
Baja California	Cimarrón	330	31%	896148	2030
Coahuila	La Carabina II	250	30%	657000	2030
Nuevo León	Sta. Catarina II	450	30%	1182600	2030

Nuevo León	Sta. Catarina III	500	30%	1314000	2030
Nuevo León	Fenicias II	700	30%	1839600	2030
Tamaulipas	Nuevo Laredo	700	30%	1839600	2030
Tamaulipas	Guadalupe	600	30%	1576800	2030
Total		3.530		9305748	

A partir de la Tabla 18 se puede comprender como México presenta un potencial de instalación eólica de 3.530 MW durante el año 2030 en diversas partes del territorio mexicano.

Considerando las plantas son proyecciones planteadas a partir del 2030, se pueden visualizar las ubicaciones propuestas en las siguientes figuras.



Figura 51: Ubicación propuesta para el parque eólico Carabina II, Coahuila. Fuente: Elaboración propia.

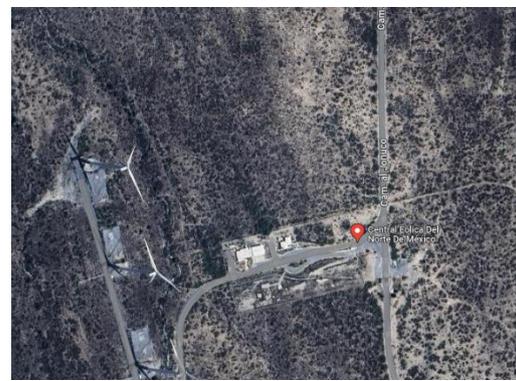


Figura 52: Ubicación propuesta para el parque eólico Santa Catarina, Nuevo León. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 51 muestra la ubicación propuesta para el parque eólico de Coahuila llamado la Carabina II con 250 MW de potencia instalada. Y la Figura 52 representa la ubicación donde se encuentra el parque actual de Santa Catarina en Nuevo León por lo que se puede asumir que los parques eólicos Santa Catarina II y III son una extensión de las plantas ya construidas.

Para el siguiente periodo se realiza una tabla similar para describir las proyecciones de parques eólicos a partir del 2032 hasta finalizar el análisis del trabajo en el 2035.

Tabla 19: Proyección de la Energía Eólica 2032-2035. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)	Factor de Planta	Obtención de MWh	Inicio de funcionamiento
Baja California	San Matias II	600	31%	1629360	2032
Nuevo León	Ventika III	900	30%	2365200	2032
Nuevo León	Ventika IV	900	30%	2365200	2032
Oaxaca	Sureste VI	800	45%	3153600	2032
Oaxaca	Sureste VII	800	45%	3153600	2032

Tamaulipas	San Carlos III	300	30%	788400	2032
Tamaulipas	Guadalupe II	800	30%	2102400	2032
Oaxaca	Sureste VIII	1000	45%	3942000	2035
Oaxaca	Sureste IX	1000	45%	3942000	2035
Tamaulipas	Nuevo Laredo II	600	30%	1576800	2035
Tamaulipas	Nuevo Laredo III	800	30%	2102400	2035
Total		8.500		27.120.960	

A partir de la Tabla 19 se puede comprender como México presenta un potencial de instalación eólica de 8.500 MW durante el periodo 2031 al 2035 en diversas partes del territorio mexicano.

La Figura 53 muestra la instalación en el parque eólico Sureste VI, VIII, VIII y Sureste IX en el estado de Oaxaca con un total de 3.600 MW de potencia instalada. Y la Figura 54 representa la ubicación donde se encuentra el parque actual de Ventika en Nuevo León por lo que se puede asumir que la ubicación es planeada donde mismo para los parques eólicos Ventika III y IV ya que son una extensión de las plantas ya construidas.



Figura 53: Ubicación propuesta para el parque eólico Sureste VI, VIII, VIII y IX, Oaxaca. Fuente: Elaboración propia.

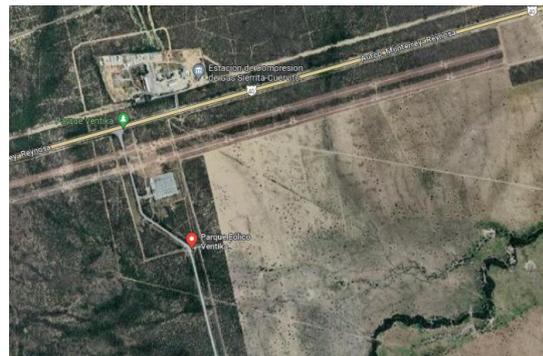


Figura 54: Ubicación propuesta para el parque eólico Ventika III y IV, Nuevo León. Fuente: Elaboración propia.

A manera de conclusión, México obtiene una capacidad total de 23.716 MW de energía eólica terrestre durante el período de duración del trabajo académico, es decir, 2020 al 2035.

▪ Energía Eólica Marina

Otra manera de implementar la energía eólica es utilizando los océanos, en este sentido, se plantea la instalación de plantas eólicas marinas.

Las razones por las que se propone esta medida son las siguientes:

1. Es una alternativa viable debido a sus ventajas respecto al mayor aprovechamiento del recurso eólico comparado con la eficiencia en el área terrestre.
2. El Banco Mundial cataloga a México como uno de los 8 países con mayor potencial técnico para el desarrollo de esta tecnología.

3. Estados Unidos y Brasil se encuentran desarrollando proyectos eólicos marinos, por lo que se prevé que México considere la aplicación de estos mismos. (P., 2023)

En este sentido, la medida energética es implementada en los Estados de Yucatán y Oaxaca porque son una de las mejores zonas con potencial eólico, como se puede ver en la Figura 7. Además, para el caso de Yucatán es una zona de campo petrolero, lo que es similar a los parques eólicos instalados en Gran Bretaña y el mar del norte. (S. D. C., 2021)

Se considera que los parques eólicos marinos se instalan con cimientos de tipo fijos para profundidades de hasta 60 m porque son el tipo de tecnología con mayor madurez en el mercado.

Actualmente, se está realizando un proyecto en Massachusetts, Estados Unidos que utiliza el aerogenerador de la marca GE Heliade-X. Por ello, se determina la instalación del mismo modelo en los parques eólicos marinos en México gracias a la experiencia adquirida en el proyecto instalado.

Para obtener la capacidad de generación neta de la planta (MWh) es necesario determinar el factor de planta. En este aspecto, la Agencia Internacional de Energías Renovables menciona que el factor para las plantas eólicas marinas es alrededor de 36%-58%. Para los futuros cálculos del presente trabajo, se estima un factor de planta del 50%. (IRENA, 2019)

En la Tabla 20, se menciona la futura proyección de la medida durante el periodo 2032 al 2035 como es: el estado (región), nombre de la planta y la capacidad del parque eólico marino.

Tabla 20: Proyección de la Energía Eólica Marina. Fuente: Elaboración propia

Estado	Nombre de la planta	Capacidad añadida (MW)	Factor de Planta	Obtención de MWh	Inicio de funcionamiento
Yucatán	Yucatán I	1.200	50%	5256000	2032
Oaxaca	Tehuantepec I	1.500	50%	6570000	2032
Yucatán	Yucatán II	1.200	50%	5256000	2035
Oaxaca	Tehuantepec II	1.500	50%	6570000	2035
Total		5.400		23652000	

A partir de la Tabla 20 se puede comprender como México presenta un potencial de instalación eólica marina de 5.400 MW durante el periodo 2032-2035 en dos zonas del territorio mexicano.

Considerando las plantas eólicas marinas son proyecciones planteadas en funcionamiento a partir del 2032, en las siguientes figuras se pueden visualizar las ubicaciones.



Figura 55: Ubicación propuesta para el parque eólico Marino Yucatán I y II. Fuente: Elaboración propia.

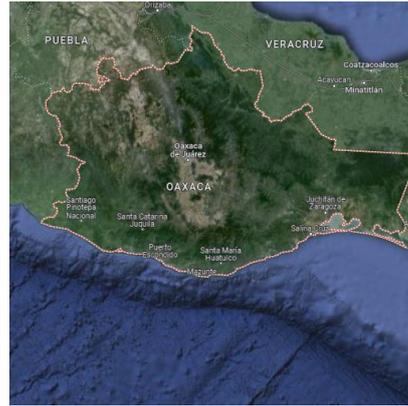


Figura 56: Ubicación propuesta para el parque eólico Marino Tehuantepec I y II. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 55 representa la ubicación del océano de Yucatán donde se plantea la instalación de dos parques con un total de 2.400 MW de potencia instalada. En la Figura 56 se muestra el océano en Oaxaca como otra ubicación privilegiada en México en la que se implementan dos parques marinos con un total de 3.000 MW de potencia instalada.

Evaluación de la medida implementada: Tecnología Eólica

En este apartado se explica detalladamente como se obtiene la evaluación cuantitativa en tema de emisiones de carbono y de incremento de generación eléctrica a través de la implementación de la energía eólica en México.

Primeramente, se considera el factor de planta, el cual es necesario para la obtención de la capacidad de la planta en MWh a través de la siguiente fórmula:

$$E_{\text{eólica marina}_i} (\text{MWh}) = \text{Potencia}_i * \text{Factor de Planta}_i * 8760 \text{ horas}$$

A manera de ejemplificación se realizan los cálculos para la medida de la proyección de la energía eólica marina Yucatán I, considerando el factor de planta del 50% descrita en la Tabla 20:

$$E_{\text{eólica marina}_i} (\text{MWh}) = 1200 \text{ MW} * 0,5 = 5.256.000 \text{ MWh}$$

Para fines prácticos y de utilización de la hoja de cálculo se convierten los MWh a ktep de la siguiente manera. Si se conoce que 1 ktep=41,87 TJ y 1 TJ= 277,78 MWh, se obtienen los siguientes cálculos:

$$E_{\text{producida}} (\text{TJ}) = \frac{5.256.000 \text{ MWh}}{277,78 \text{ MWh}} = 18.921,44 \text{ TJ}$$

$$E_{\text{producida}} (\text{ktep}) = \frac{18.921,44 \text{ TJ}}{41,87 \text{ TJ}} = 451,90 \text{ ktep}$$

La obtención del resultado en ktep se utiliza para la disminución de emisiones de carbono referente a la generación de electricidad, dicha variable es utilizada en la hoja de cálculo como se puede observar en el capítulo 9 Anexos.

A partir de las mejoras para el incremento de la energía eólica en México se realiza la siguiente tabla con el fin de resumir la obtención de los cálculos para representarlos en la hoja de cálculo.

Tabla 21: Implementación de Energía Eólica total en México. Fuente: Elaboración propia

Medida	Adición de capacidad (MW)	Obtención de MWh	ktep	Periodo de proyección
Parques eólicos 2023-2025	3.151	10371402	891,73	2023-2035
Parques eólicos 2027	8.535	25218726	2168,30	2027-2035
Parques eólicos 2030	3.530	9305748	800,11	2030-2035
Parques eólicos 2032-2035	8.500	27120960	2331,85	2032-2035
Parques eólicos marinos 2032-2035	5.400	23652000	2033,59	2032-2035
Total	29.116	95668836	8225,58	

Para concluir la medida eólica a implementar se analiza la tabla, donde se puede observar un incremento total de 29.116 MW por energía proveniente del viento, y así como también una disminución total de 8225,58 ktep de reducción de emisiones de carbono gracias al desarrollo de la energía eólica.

Se concluye la implementación de la medida eólica con la Figura 57, la cual muestra el potencial de energía eólica en cada zona del territorio mexicano.

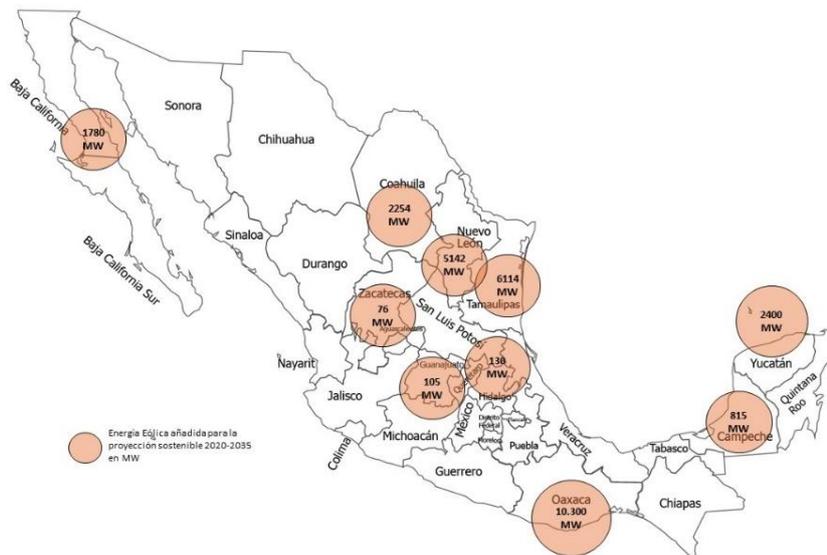


Figura 57: Expansión de la Energía Eólica en México 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

La proyección determina un aumento de capacidad de energía eólica de 29.116 MW en todo el territorio mexicano, pero con un énfasis especial en la zona sur, específicamente Oaxaca. Esto es debido a la zona de Tehuantepec, que es considerada como la mejor área de ráfagas de viento por la misma estructura territorial de México.

5.3.4 Medida 4: Incremento de la Energía Nuclear.

El crecimiento de la energía nuclear es una base esencial para promover la seguridad energética del país. En este sentido, se considera la creación de una planta nuclear en Nuevo León y la

extensión de la ya existente Laguna Verde Veracruz con un total de tres reactores y un total de 4.050 MW de potencia instalada. A continuación, se presenta una línea del tiempo para poder visualizar detalladamente el desarrollo de la energía Nuclear en el territorio mexicano durante el período del desarrollo del trabajo académico.



Figura 58: Línea del tiempo del desarrollo de la Energía Nuclear del 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

A pesar de que la energía nuclear representa una cuestión complicada debido a su riesgo de operación. Se puede mencionar que de acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Central nucleoelectrica Laguna verde opera con las más exigentes regulaciones de seguridad y lineamientos internacionales. Y para garantizarlo, la central cuenta con el monitoreo por parte de organizaciones internacionales como la Organización Mundial de Operadores Nucleares (WANO), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). (CFE, 2021)

La energía nuclear ha evolucionado y por lo tanto sus regulaciones en el tema de la seguridad, considerando este aspecto los mexicanos muestran una confianza hacia este tipo de tecnología debido a su correcto uso en las instalaciones en funcionamiento de la Central nucleoelectrica Laguna Verde.

Se propone el incremento de la energía nuclear a través de la implementación de tecnología con reactores avanzados de agua en ebullición (ABWR). El primer ABWR comenzó su operación en Japón con dos unidades en el año 1996 de la marca GE Hitachi. Es importante destacar que actualmente los ABWR tienen licencia en Estados Unidos, Japón y Taiwán.

Las razones por las cuales se elige este tipo de tecnología son las siguientes:

1. Es catalogado como la segunda tecnología más implementada con 15% del total de todos los reactores instalados a nivel mundial.
2. Utilizan el mismo diseño de combustible que los convencionales BWR de Laguna Verde.
3. Amplia experiencia operacional con el uso de la tecnología BWR, lo que implicaría un ahorro económico al país en lo que se refiere a entrenamiento de personal que laboraría dentro de la planta. (Gómez A., 2005)

La medida constará de un total de tres reactores ABWR de 1.350 MW cada uno, dos de ellos estarán localizados en la central nucleoelectrica de Laguna Verde, y el último se instalará en

Nuevo León. El tiempo de construcción de este tipo de reactores es alrededor de 48-56 meses de acuerdo con los diseños previos y por documentos liberados por GE.

La Figura 59 muestra la actual ubicación de la planta nucleoelectrica mexicana, en esta misma se considera la instalación de dos reactores ABWR que empezarán su construcción a partir del 2026 y estarán en funcionamiento a partir del 2032.

Su implementación puede ser más sencilla por el hecho de que representa una extensión de la planta nuclear ya existente Laguna Verde, se conoce que dicha planta tiene el espacio suficiente para albergar esta tecnología debido a propuestas realizadas por investigadores mexicanos.



Figura 59: Planta nuclear Laguna Verde, Veracruz. Fuente: Elaboración propia

El último reactor de 1.350 MW se instalará en Nuevo León y se prevé su inicio de construcción a partir del 2030 y entraría en funcionamiento a partir del 2035.

Se proyecta en la zona norte de México debido al incremento de la demanda energética proveniente de un gran crecimiento industrial por parte de inversionistas extranjeros, y por ende, existe una alta demanda de energía eléctrica para la producción de bienes. Aunado que Nuevo León se perfila como el Estado más consumidor de energía eléctrica de todo México de acuerdo con un estudio realizado por la COPARMEX Nuevo León. (COPARMEX, 2022)



Figura 60: Ubicación propuesta para planta nuclear en Nuevo León. Fuente: Elaboración propia

La Figura 60 representa la ubicación proyectada para la futura planta nuclear en Nuevo León. Se considera la región Poniente de Santa Catarina, en una zona alejada del desarrollo poblacional, pero al mismo tiempo representa una zona en pleno auge debido a que se pretende desarrollar la industria automotriz en la región.

Evaluación de la medida implementada: Tecnología nuclear

En este apartado se explica detalladamente como se obtiene la evaluación cuantitativa en tema de emisiones de carbono y de incremento de generación eléctrica a través de la implementación de la energía nuclear en México.

Se determina un factor de capacidad del 90% debido a que una planta nuclear sigue una tendencia entre 60% - 90%, de acuerdo con datos presentados por el Organismo Internacional de Energía Atómica. (M., 2022)

Los cálculos se realizan con el fin de ejemplificar el cálculo total de beneficio al implementar la tecnología en México. A continuación, se presentan los cálculos para obtener el valor representado en ktep de la medida de implementación de los dos reactores en Laguna Verde.

$$P_{\text{nuclear}_i} (\text{MW}) = \text{cantidad de reactores} * \text{capacidad de la unidad (MW)}$$

Sustituyendo dicha fórmula, se obtiene la capacidad total:

$$P_{\text{nuclear}_i} (\text{MW}) = 2 * 1350 \text{ MW} = 2.700 \text{ MW}$$

En este caso, se requiere aplicar el factor de capacidad para obtener los MWh utilizando la siguiente fórmula:

$$E_{\text{nuclear}_i} (\text{MWh}) = \text{Potencia}_i * \text{Factor de capacidad}_i * \text{Horas al año}$$

Para la obtención del factor de capacidad se utiliza el mencionado anteriormente, siendo un valor del 90%. Sustituyendo la fórmula se obtiene el siguiente cálculo:

$$E_{\text{nuclear}_i} (\text{MWh}) = 2.700 \text{ MW} * 0,90 * 8760 \text{ horas}$$

$$E_{\text{nuclear}_i} (\text{MWh}) = 21.286.800 \text{ MWh}$$

Para fines prácticos y de utilización de la hoja de cálculo se convertirán los MWh a ktep de la siguiente manera. Si se conoce que 1 ktep=41,87 TJ y 1 TJ= 277,78 MWh, se obtienen los siguientes cálculos:

$$E_{\text{producida}} (\text{TJ}) = \frac{21.286.800 \text{ MWh}}{277,78 \text{ MWh}} = 76.631,86 \text{ TJ}$$

$$E_{\text{producida}} (\text{ktep}) = \frac{76.631,86 \text{ TJ}}{41,87 \text{ TJ}} = 1830,23 \text{ ktep}$$

La obtención del resultado en ktep se utiliza para la disminución de emisiones de carbono referente a la generación de electricidad, dicha variable es utilizada en la hoja de cálculo como se puede observar en el capítulo 9 Anexos.

Tabla 22: Implementación de Energía Nuclear total en México. Fuente: Elaboración propia

Medida	Adición de capacidad (MW)	Obtención de MWh	ktep	Periodo de proyección
Construcción de 2 reactores ABWR en Laguna verde	2.700	21.286.800	1830,23	2032-2035
Construcción de 1 reactor ABWR en Nuevo León	1.350	10.643.400	915,11	2035
Total	4.050	31.930.200	2745,34	

A partir de la Tabla 22 se puede concluir que para el año 2030 se comienza a tener una contribución de 1830,23 ktep debido a la construcción de los dos reactores en la planta Laguna verde. Y a partir del 2035 se cuenta con una reducción de emisiones de un total de 2745,34 ktep por medio de la contribución total de la nueva central nuclear en Nuevo León.

Se concluye la implementación de la medida nuclear con la Figura 61, la cual muestra el potencial de energía nuclear en el territorio mexicano.

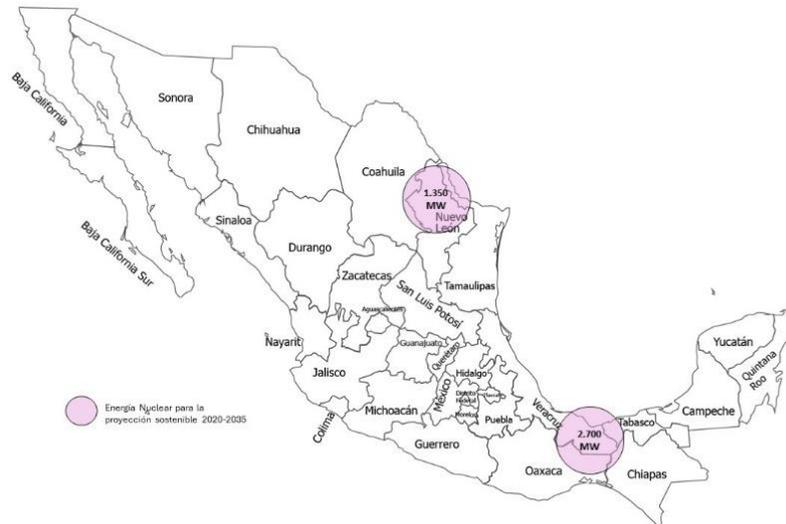


Figura 61: Expansión de la Energía Nuclear en México 2020-2035. Fuente: Elaboración propia

La proyección determina un aumento de capacidad de energía nuclear de 4.050 MW en todo el territorio mexicano durante el período de análisis 2020-2035.

5.3.5 Medida 5: Retiro progresivo de centrales carboeléctricas.

La medida de sostenibilidad consiste en el Plan de retiro de las Unidades de carbón. Una de las razones por las cual es necesario eliminarlo de la matriz energética es sencillamente porque representa el recurso de fuente de energía más perjudicial y contaminante.

Para el cumplimiento referente a la reducción de gases de efecto invernadero, se realiza una sustitución paulatina del uso del carbón para la generación eléctrica. Teniendo en cuenta que las carboeléctricas generan contaminantes, como también, daños en salud pública y climática.

Los datos de la Comisión Federal de Electricidad determinan que en México tan solo hay un total de tres centrales carboeléctrica y forman parte del parque de generación eléctrica mexicano.

Las centrales carboeléctricas José López Portillo y Carbón II se encuentran ubicadas en Nava, Coahuila, con una capacidad de generación eléctrica de 1.200 MW y 1.400 MW, respectivamente. Mientras que en Guerrero se encuentra la central Plutarco Elías Calles con una capacidad de 2.778 MW de generación eléctrica. Siendo un total de 5.378 MW producidos por generación eléctrica con carbón. (CFE, 2021)



Figura 62: Centrales carboeléctricas José López Portillo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 63: Centrales carboeléctricas Plutarco Elías Calles. Fuente: Elaboración propia.

Para el año 2020, el carbón contribuye con un 8% de generación eléctrica para el territorio mexicano. Asimismo, es posible obtener que la utilización del carbón genera un 13,54% de las emisiones de CO₂ en el territorio mexicano, dicho valor es obtenido por medio de los datos 2020 de la Agencia Internacional de Energía.

En este sentido, se obtiene que las emisiones totales para generación eléctrica son de 185.438 CO₂ (kt) y que la cifra de emisiones por generar electricidad con carbón es de 25.112 CO₂ (kt) en el año 2020.

La sustitución planteada se lleva a cabo de manera progresiva con el fin de lograr que México para el año 2030 sustituya por completo el carbón por la utilización de fuentes limpias (eólica, solar, hidroeléctrica) para la producción de electricidad.

La medida de sostenibilidad prevé el retiro de las 3 plantas carboeléctricas durante la realización de este estudio, siendo que a partir del 2030 se detendrá el uso del carbón como fuente de generación de electricidad. Como se puede observar en la siguiente tabla como el consumo del carbón comienza a reducirse a partir del 2025 con un 20%, para el 2027 con 70% y finalizando con el 100% para el año 2030.

Los consumos tendenciales (ktep) procedentes de las centrales de carbón provienen de datos de la Agencia Internacional de Energía, y se representan en la siguiente tabla.

Tabla 23: Implementación de la medida de retiro de centrales carboeléctricas. Fuente: Elaboración propia con datos de (International Energy Agency, 2022)

	Tendencial (ktep)	% de sustitución	Energía sustituida (ktep)	Sostenible (ktep)
2020	4462	0%	0,0	0,0
2021	4.508	0%	0,0	0,0
2023	4.602	0%	0,0	0,0
2025	4.698	20%	939,6	3758,4
2027	4.796	70%	3357,5	1438,9
2030	4.948	100%	650,9	0,0

A través de la Tabla 23 se puede entender que para el año 2025 existe un consumo tendencial de 4.698 ktep de carbón y se propone una sustitución del 20% con energías renovables, lo que

resulta en una disminución de 939,6 ktep. Significando que el valor de energía demandada por el carbón en el escenario sostenible es de tan solo 3758,4 ktep.

Asimismo, en el 2027 se considera una sustitución del 70% que términos de energía esto es un total de sustitución de 3357,5 ktep obtenido del valor del escenario tendencial.

Y para finalizar la aplicación de la medida en el 2030 se tiene un total del 100% de sustitución, es decir, se habrá retirado por completo la generación de energía eléctrica a partir del carbón. Por esta razón se suma el acumulado de energía (ktep) sustituidos durante el 2025 y 2027.

En este sentido, se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{Energía sustituida}_{2030} = \text{Consumo tendencial 2030} - \sum \text{Energía sustituida}_{2027, 2030}$$

Se sustituye los valores con el fin de encontrar el valor restante de energía sustituida (ktep) para poder concluir con el 100%. Sustituyendo dicha fórmula, se puede obtener lo siguiente:

$$\text{Energía sustituida}_{2030} = 4.948 \text{ ktep} - 939,6 - 3357,5 = 650,9$$

Por lo que para finalizar en el periodo 2030 se sustituyen 650,9 ktep. Al realizar la eliminación del carbón significa que las plantas generan a una menor capacidad debido a que el recurso del carbón se ha limitado. Se entiende que la demanda por energía eléctrica continúa, por lo que se sustituye con el desarrollo y apertura de plantas de generación eléctrica de origen renovable.

La implementación del aumento de las energías limpias para sustituir el uso del carbón se profundiza en la siguiente sección.

Evaluación de la medida implementada: Retiro progresivo de centrales carboeléctricas

En este apartado se explica detalladamente como se sustituye el uso del carbón como medio de generación eléctrica a través de los recursos naturales sin generación de emisiones de carbono.

Primeramente, se puede entender que, con las medidas aplicadas de incremento de generación eólica, solar e hidroeléctrica durante el periodo de análisis, se utiliza esa energía producida para sustituir la energía producida por el carbón. Por lo que en la Tabla 24 se puede observar un resumen de la cantidad de potencia instalada durante el período 2025-2030 con el fin de corroborar que la energía será proveniente de energías renovables.

Tabla 24: Potencia instalada proveniente de fuentes renovables 2025-2030. Fuente: Elaboración propia

	Eólica (MW)	Solar (MW)	Hidroeléctrica (MW)
2025	2435	1570,08	534
2027	8535	5309,5	1340,2
2030	3530	4623	1320

Con los datos de la Tabla 24 se puede conocer el total de potencia instalada proveniente de energías renovables durante el periodo 2025-2030. A continuación, se realiza una conversión de los ktep a la potencia instalada necesaria a partir de los diferentes medios de generación eléctrica.

Tabla 25: Origen renovable de la Energía sustituida del carbón. Fuente: Elaboración propia

Año	Energía Total sustituida (ktep)	Energía sustituida (ktep)	TJ	MWh	MW	Fuente proveniente
2025	939,6	586,87	24.572,65	6.825.792	2435	Eólica
		236,49	9902,22	2.750.640	1570	Solar
		116,24	4867,00	1351946,60	190,53	Hidroeléctrica
2027	3357,5	2057,09	86.130,43	23.925.290,90	8535	Eólica
		482,8	20.214,80	5.615.277,1	3205,06	Solar
		817,62	34.233,70	9.509.450,90	1340,2	Hidroeléctrica
2030	650,9	650,9	27266	7573957,4	1067,4	Hidroeléctrica

La Tabla 25 muestra que la energía proveniente del carbón es sustituida por fuentes de energías renovables siendo un mix energético necesario para poder lograrlo, entre estas: fuente eólica, solar y la hidroeléctrica.

A continuación, se explica detalladamente como se obtiene la energía para el año 2025 usando energías limpias para la sustitución del carbón al finalizar el periodo de análisis. Conociendo que el valor de 1ktep=41,87 TJ y 1 TJ=277,78 MWh se lleva a cabo el ejemplo para el total de 939,6 ktep de energía sustituida. En este caso, se divide en tres partes, debido a la inviabilidad de cubrir toda la energía con un solo tipo de fuente de energía.

$$E_{\text{producida}} (\text{TJ}) = \text{Cantidad de Energía sustituida (ktep)} * 41,87 \text{ TJ}$$

Sustituyendo dicha fórmula, se obtiene la capacidad total:

$$E_{\text{producida}} (\text{TJ}) = 586,87 \text{ ktep} * 41,87 = 24.572,65 \text{ TJ}$$

Para poder obtener los MWh se utiliza la siguiente fórmula:

$$E_{\text{carbón}_i} (\text{MWh}) = 24.572,65 \text{ TJ} * 277,78 \text{ MWh} = 6.825.792 \text{ MWh}$$

Para finalizar la cantidad de MW provenientes de energía eólica es necesario determinar un factor de planta eólico. En este caso se utiliza el valor promedio del factor de las plantas eólicas en México mencionado en la Tabla 15, el cual tiene un valor de 0,32.

$$P_{\text{eolica}_i} (\text{MW}) = \frac{E_{\text{carbón}_i} (\text{MWh})}{8760 \text{ hras} * \text{Factor promedio planta eólica}} = \frac{6.825.792 \text{ MWh}}{8760 \text{ horas} * 0,32} = 2435 \text{ MW}$$

A partir del cálculo, se puede entender que la cantidad de Megavatios instalados de energía eólica es de 2435 MW para poder sustituir una parte de la energía proveniente del carbón en el 2025.

Para obtener la cantidad de MW provenientes de la Energía solar, es necesario determinar el factor de planta solar. En este caso, el factor de planta puede ser determinado dividiendo la salida real con la salida posible máxima.

En materia de potencia total instalada solar se tiene 27.706,18 MW de acuerdo con la Tabla 14 para el desarrollo del escenario sostenible 2020-2035.

Conociendo el valor de potencia instalada es posible encontrar el valor ideal de Megavatios-horas producidos por una planta a plena capacidad y considerando un 100% de disponibilidad, obteniendo el valor de salida posible de la planta. En este sentido, se realiza el siguiente cálculo:

$$E_{\text{Solar}_i} (\text{MWh}) = \text{Potencia}_i * 8760 \text{ horas} = 27.706,18 * 8760 \text{ horas} = 242.706.136,8 \text{ MWh}$$

Continuando con los cálculos para obtener el factor de capacidad, se realiza una división de la salida real con la salida posible máxima. Para esto, se considera que el valor real es el obtenido considerando los datos de producción anual FV (kWh) y la capacidad de las plantas propuestas, siendo un valor de 49.287.824,95 MWh, mencionado en la Tabla 14.

$$FP_{\text{Solar}} = \frac{49.287.824,95 \text{ MWh}}{242.706.136,8 \text{ MWh}} = 0,20$$

El factor de planta se utiliza a continuación para poder la cantidad de potencia instalada necesaria por parte del recurso solar.

$$P_{\text{solar}_i} (\text{MW}) = \frac{E_{\text{carbón}_i} (\text{MWh})}{8760 \text{ horas} * \text{Factor promedio planta solar}} = \frac{2.750.640 \text{ MWh}}{8760 \text{ horas} * 0,20} = 1570 \text{ MW}$$

A partir del cálculo, se puede entender que la cantidad de Megavatios instalados de la energía solar es de 1570 MW para poder sustituir una parte de la energía proveniente del carbón en el 2025.

Para obtener la cantidad de MW provenientes de la Energía hidroeléctrica, es necesario determinar el factor de planta solar. En este caso, el factor de planta se utiliza el utilizado en cálculos anteriores, el cual tiene un valor de 0,81 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2022) mencionado en la sección “Evaluación de la medida implementada: Tecnología Hidroeléctrica” empleado en la elaboración del trabajo académico.

Utilizando el valor del factor de las plantas hidroeléctricas en México, se obtiene el siguiente cálculo:

$$P_{\text{hidroeléctrica}_i} (\text{MW}) = \frac{E_{\text{carbón}_i} (\text{MWh})}{8760 \text{ horas} * FP_{\text{hidroeléctrica}}} = \frac{1351.946,6 \text{ MWh}}{8760 \text{ horas} * 0,81} = 190,53 \text{ MW}$$

A partir del cálculo, se puede entender que la cantidad de Megavatios instalados de la energía hidroeléctrica es de 190,53 MW para poder sustituir el carbón en el 2025.

Entonces, para la sustitución del año 2025, es necesario contar con 2435 MW de energía eólica, 1570 MW de energía solar y 190,53 MW de energía hidroeléctrica.

Los cálculos matemáticos mencionados anteriormente se utilizan a manera de ejemplificar la manera en que se obtuvo el valor para cada periodo de tiempo, para el 2027 y finalizando con el 2030. Es importante considerar el tipo de fuente renovable que es utilizada para ese periodo para poder obtener los cálculos de manera adecuada.

Para concluir, se entiende que la potencia instalada de energías renovables es suficiente para lograr el reemplazo de las plantas de carbón en México durante el periodo 2025-2030, además se considera que existen remanentes de potencia instalada proveniente de la energía hidroeléctrica y solar, los cuales serán utilizados en la última medida a implementar.

5.3.6 Medida 6: Transición hacia la movilidad eléctrica

El sector de transporte se encuentra en la segunda posición como el mayor consumidor de energéticos en México, esto hace referencia mayormente al consumo del petróleo para la movilidad.

El presente trabajo académico demuestra que tan solo en el año 2020 el consumo del petróleo es de un 60% derivado de la demanda para el sector del transporte. Uno de los objetivos de la

proyección sostenible es reducir 13% las emisiones de carbono respecto al tendencial, en este aspecto se determina como una medida factible la sustitución del uso del combustible fósil para los vehículos convencionales proponiendo el uso de automóviles eléctricos.

La medida sostenible consiste en una sustitución progresiva de los vehículos fósiles derivado del actual aumento considerable en los precios de la gasolina, además de su posible expansión y reducción de precios por la apertura de nuevas plantas automotrices en México, en los que se puede mencionar la planta de Tesla en Monterrey.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) determina que el territorio de México tiene un parque vehicular de 55.167.421. Sin embargo, de ese total tan solo de vehículos se tiene 36.812.412. Y de autobuses de pasajeros una cantidad total de 798.494. Y, por último, de camiones de carga 11.484.755. Es decir, del total de vehículos automotores registrados, el 70% corresponde a automóviles, el 21% a camiones y camionetas de carga, el 8% a motociclistas y el 1% a autobuses para pasajeros.

De acuerdo con la información presente en los boletines del Gobierno de México es posible conocer que para el 2023 se tiene un total de 13.523 automóviles eléctricos.

Es necesario realizar diversos cálculos para obtener las emisiones de carbono provenientes de cada vehículo. Para esto, se consideran los siguientes valores representados en la Tabla 26.

Tabla 26: Datos para los cálculos de emisiones por vehículo. Fuente: Elaboración propia

Propiedad	Valor
Factor de emisión de gasolina (kgCO ² /litro)	2,33
Gasto anual de km por automóvil	15.000
Rendimiento promedio (km/litro)	12
Consumo anual de gasolina (litros)	1.250
Emisión anual por automóvil (kgCO ²)	2914,56
Emisión anual por automóvil (ktep)	0,00092
Emisión anual del total del parque vehicular (ktep)	33669,69

El factor de emisiones de gasolina es determinado por medio de la información proporcionada por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en México.

Para fines de cálculos, se considera la cantidad promedio de recorrido en km realizados por un automóvil por año, siendo 15.000 km (Renault, 2021) y el rendimiento del combustible es de 12 km por litro. (D., 2023). Realizando la división de los km por automóvil entre el rendimiento por litro es posible obtener que un coche consume alrededor de 1.250 litros anualmente.

Considerando el consumo anual (litros) de un automóvil se determinan las emisiones anuales utilizando el factor de emisiones de gasolina de 2,33 kgCO₂/litro. Por lo que al realizar el cálculo se obtiene un total de 2914,56 kgCO₂ anuales.

Para la obtención de ktep es necesario convertir los kgCO₂ a ktep. En este sentido se toma en cuenta lo siguiente: 270 kgCO₂ = 1 MWh, 1MWh=0,086 tep. A continuación, se realizan los cálculos para la obtención de Emisiones anuales por automóvil (ktep).

Primeramente, las emisiones en kgCO₂ se convierten a Megavatios-hora con el siguiente cálculo:

$$E_{\text{petróleo}} (\text{MWh}) = \frac{\text{Emisión anual por automóvil (kgCO}_2)}{270 \text{ kgCO}_2} = \frac{2914,56 \text{ kgCO}_2}{270 \text{ kgCO}_2} = 10,79 \text{ MWh}$$

Seguidamente, los Megavatios-hora se convierten a ktep:

$$E_{\text{producida}} (\text{tep}) = \text{MWh} * 0,086 \text{ tep} = 10,79 \text{ MWh} * 0,086 \text{ tep} = 0,92 \text{ tep}$$

Se obtiene un total de emisiones 0,92 tep, lo cual es equivalente a 0,00092 ktep de emisiones por automóvil de manera anual.

Por lo que, para conocer el total de emisiones para todo el parque vehicular, tan solo consiste en realizar el siguiente cálculo:

$$\text{Emisiones del parque vehicular} = \text{emisión por automóvil} * \text{cantidad de autos}$$

Sustituyendo la fórmula para la cantidad total del parque vehicular en el 2023, se obtiene lo siguiente:

$$\text{Emisiones del parque vehicular} = 0,00092 \text{ ktep} * 36.597.606 \text{ autos} = 33669,79 \text{ ktep}$$

El número total de automóviles se obtiene a partir de los datos registrados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), donde se menciona que en el 2023 hay un total de 36.812.412 autos, sin embargo, existen un total de 214.806 automóviles ecológicos. En conclusión, se tienen 36.597.606 automóviles totalmente de combustibles fósiles.

Se puede entender que en México en el año 2023 tan solo 33.669,79 ktep de emisiones son de solo automóviles privados. Esta es una razón fundamental por la cual la medida de la transición hacia la electromovilidad es esencial para que la sociedad se desarrolle de manera sostenible considerando preservar el medio ambiente a través de la reducción de las emisiones de carbono.

Para poder llevar a cabo la transición de manera satisfactoria, se debe considerar que el hecho de sustituir el uso de combustible fósil, sin duda aumentará el consumo de energía eléctrica para poder movilizar los coches eléctricos. Considerando el nuevo panorama, se requiere aumentar la generación de electricidad para satisfacer esta necesidad, por lo tanto, se plantea el aumento de energías renovables.

Tabla 27: Proyección de sustitución gradual de autos de combustibles fósiles por autos eléctricos 2023-2035. Fuente: Elaboración propia.

	% de sustitución de coches	Cantidad de coches	Ktep reducidos
2023	0,03%	13.523	12,44
2025	0,5%	184.062	169,33
2027	0,9%	331.312	304,80
2030	4,5%	1.656.558	1524,03
2032	5,5%	2.024.683	1862,71
2035	9,0%	3.313.117	3048,07
	20,43%	7.523.255	6921,39

La Tabla 27 representa el progreso para realizar la sustitución gradual de los coches de combustión por los coches eléctricos. En el año 2023, se considera un total de 13.523 autos porque son los autos eléctricos que se encuentran registrados en el gobierno de México en ese periodo.

Para los siguientes periodos se puede contribuir a un porcentaje de sustitución del 0,5% para el 2025, seguido del 0,9% para el siguiente periodo. Finalizando en el 2035 con un 9%, por lo que al concluir la medida del 2023 al 2035 se tiene un total de 20,43% de autos eléctricos en México.

Los ktep reducidos provienen del siguiente cálculo, en este caso se ejemplifica el del periodo 2023, y se considera el valor obtenido anteriormente para las emisiones anuales de un auto siendo un total de 0,00092 ktep.

$$\text{ktep reducidos} = \text{Emisión anual por auto (ktep)} * \text{cantidad de coches}$$

Se sustituye la fórmula para obtener el valor de ktep reducidos, es decir, las emisiones de carbono retenidas debido a la sustitución de los combustibles fósiles.

$$\text{ktep reducidos} = 0,00092 \text{ ktep} * 13.523 = 12,44 \text{ ktep}$$

La implementación de la medida brinda un beneficio total de 6921,39 ktep, que es la cantidad de emisiones de carbono no liberadas al medio ambiente.

Evaluación de la medida implementada: Transición hacia la movilidad eléctrica

En este apartado se explica detalladamente como las fuentes de origen renovable satisfacen la nueva demanda energética de los coches eléctricos.

Primeramente, se puede entender que, con las medidas anteriormente aplicadas de incremento de generación eólica, solar e hidroeléctrica durante el periodo de análisis, se utiliza esa energía producida para abastecer la demanda proveniente de los coches eléctricos.

Por lo que en la Tabla 28 se puede observar un resumen de la cantidad de potencia instalada durante el período 2023-2035 con el fin de corroborar que la energía proveniente de energías renovables es capaz de satisfacer la nueva demanda.

Tabla 28: Potencia instalada proveniente de fuentes renovables 2023-2035. Fuente: Elaboración propia

	Eólica (MW)	Solar (MW)	Hidroeléctrica (MW)
2023	716	1307,6	0
2025	2435	1570,08	534
2027	8535	5309,5	1340,2
2030	3530	4623	1320
2032	7800	4216	2750
2035	6100	10680	2750

Con los datos de la Tabla 28 se puede conocer el total de potencia instalada proveniente de energías renovables durante el periodo 2023-2035. Es importante considerar, que en la “medida 5: Retiro progresivo de centrales carboeléctricas” se realiza un consumo de las energías renovables instaladas para satisfacer la generación eléctrica por medio del carbón. En este sentido, se realiza una nueva tabla para poder demostrar el cumplimiento a la medida implementada utilizando energías renovables.

Tabla 29: Potencia instalada disponible de fuentes renovables 2023-2035. Fuente: Elaboración propia

	Eólica (MW)	Solar (MW)	Hidroeléctrica (MW)
2023	716	1307,60	0
2025	0	0	344
2027	0	2104,44	0
2030	3530	4623	252,6
2032	7800	4216	2750
2035	6100	10.680	2750

La Tabla 29 representa la potencia instalada actualizada después de disminuir el consumo de energía que se implementa en la medida del retiro de centrales carboeléctricas, con el fin de demostrar que las energías renovables pueden satisfacer la demanda energética proveniente de los coches eléctricos.

A continuación, se realiza una conversión de los ktep a la potencia instalada necesaria a partir de los diferentes medios de generación eléctrica.

Tabla 30: Origen renovable de la Energía sustituida del combustible fósil. Fuente: Elaboración propia

Año	Energía Total reducida (ktep)	TJ	MWh	MW	Fuente proveniente
2023	12,44	520,91	144.698,76	51,62	Eólica
2025	169,34	7090,14	1.969.500,25	277,57	Hidroeléctrica
2027	304,81	12762,26	3.545.100,45	2023,46	Solar
2030	1524,03	63.811,30	9.749.026,23	3477,82	Eólica
			7.976.476,01	4552,78	Solar
2032	1862,71	77991,59	21.664.502,74	7728,49	Eólica
2035	3048,07	127622,60	10832251,37	3864,24	Eólica
			17725502,24	10.117,30	Solar

La Tabla 30 muestra que la energía proveniente del petróleo utilizado por los automóviles es sustituida por fuentes de energías renovables para ser utilizada en los coches eléctricos. Para esto, es necesario considerar un mix energético para poder llevarlo a cabo satisfactoriamente, las fuentes renovables son las siguientes: fuente eólica, solar y la hidroeléctrica.

A continuación, se explica detalladamente como se obtiene la energía para el año 2030 usando la generación de energías limpias para la sustitución del petróleo al finalizar el periodo de análisis.

Conociendo que el valor de 1ktep=41,87 TJ y 1 TJ=277,78 MWh se lleva a cabo el ejemplo para el total de 1524,03 ktep de energía reducida. En este caso, se divide en dos partes, debido a la inviabilidad de cubrir toda la energía con un solo tipo de fuente de energía.

$$E \text{ producida (TJ)} = \text{Cantidad de Energía reducida (ktep)} * 41,87 \text{ TJ}$$

Sustituyendo dicha fórmula, se obtiene la capacidad total:

$$E \text{ producida (TJ)} = 1524,03 * 41,87 = 63.811,30 \text{ TJ}$$

Para poder obtener los MWh se utiliza la siguiente fórmula:

$$E_{\text{petróleo}_i} \text{ (MWh)} = 63.811,30 \text{ TJ} * 277,78 \text{ MWh} = 17.725.502,24 \text{ MWh}$$

Se puede observar en la Tabla 30 como para el periodo 2030 la cantidad de Megavatios-hora se encuentra dividida entre dos, debido a que la energía eólica es capaz de colaborar con un 55% y el 45% proviene de la energía solar.

Para finalizar la cantidad de MW provenientes de energía eólica es necesario determinar un factor de planta eólico. En este caso se utiliza el valor promedio del factor de las plantas eólicas en México mencionado en la Tabla 15, el cual tiene un valor de 0,32.

$$P_{\text{eólica}_i} \text{ (MW)} = \frac{E_{\text{petróleo}_i} \text{ (MWh)}}{8760 \text{ horas} * \text{Factor promedio planta eólica}} = \frac{9.749.026,23 \text{ MWh}}{8760 \text{ horas} * 0,32} = 3477,82 \text{ MW}$$

Para obtener la cantidad de MW provenientes de la Energía solar, es necesario determinar el factor de planta solar. En este caso, el factor de planta puede ser determinado dividiendo la salida real con la salida posible máxima.

En materia de potencia total instalada solar se tiene 27.706,18 MW de acuerdo con la Tabla 14 para el desarrollo del escenario sostenible 2020-2035.

Conociendo el valor de potencia instalada es posible encontrar el valor ideal de Megavatio-horas producidos por una planta a plena capacidad y considerando un 100% de disponibilidad, obteniendo el valor de salida posible de la planta. En este sentido, se realiza el siguiente cálculo:

$$E_{\text{Solar}_i} (\text{MWh}) = \text{Potencia}_i * 8760 \text{ horas} = 27.706,18 * 8760 \text{ horas} = 242.706.136,8 \text{ MWh}$$

Continuando con los cálculos para obtener el factor de capacidad, se realiza una división de la salida real con la salida posible máxima. Para esto, se considera que el valor real es el obtenido considerando los datos de producción anual FV (kWh) y la capacidad de las plantas propuestas, siendo un valor de 49.287.824,95 MWh, mencionado en la Tabla 14.

$$FP_{\text{Solar}} = \frac{49.287.824,95 \text{ MWh}}{242.706.136,8 \text{ MWh}} = 0,20$$

El factor de planta se utiliza a continuación para poder la cantidad de potencia instalada necesaria por parte del recurso solar.

$$P_{\text{solar}_i} (\text{MW}) = \frac{E_{\text{petróleo}_i} (\text{MWh})}{8760 \text{ horas} * \text{Factor promedio planta solar}} = \frac{7.976.476,01}{8760 \text{ horas} * 0,20} = 4552,78$$

A partir de los cálculos obtenidos para el 2030, se puede entender que la cantidad de Megavatio instalados de la energía eólica es de al menos 3477,82 MW y de energía solar es de 4552,78 MW para poder satisfacer la demanda de los coches eléctricos en el 2030.

Los cálculos matemáticos mencionados anteriormente se utilizan a manera de ejemplificar la manera en que se obtuvo el valor para cada periodo de tiempo, finalizando con el 2035.

Es importante considerar el tipo de fuente renovable que es utilizada para ese periodo para poder obtener los cálculos de manera adecuada considerando el factor de planta correcto. Se puede ver el ejemplo de cálculos para la hidroeléctrica en la medida anteriormente realizada, es decir, la quinta medida implementada.

Para concluir, se demuestra que las energías renovables son capaces de satisfacer la demanda de la energía eléctrica de los coches eléctricos por medio de la comparación entre la Tabla 29 y 30 respecto a los MW durante todo el periodo de análisis.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para comenzar a analizar los resultados obtenidos por medio de la implementación de las medidas de sostenibilidad en México se muestran un conjunto de Figuras en las que se representan los indicadores de manera gráfica.

En este apartado se muestran los resultados para los indicadores ambientales, socioeconómicos, energéticos y de renovables.

- Ambientales

Para comenzar se muestran las siguientes gráficas donde se es capaz de visualizar de manera general variaciones en los indicadores ambientales para el periodo de análisis 2020-2035.

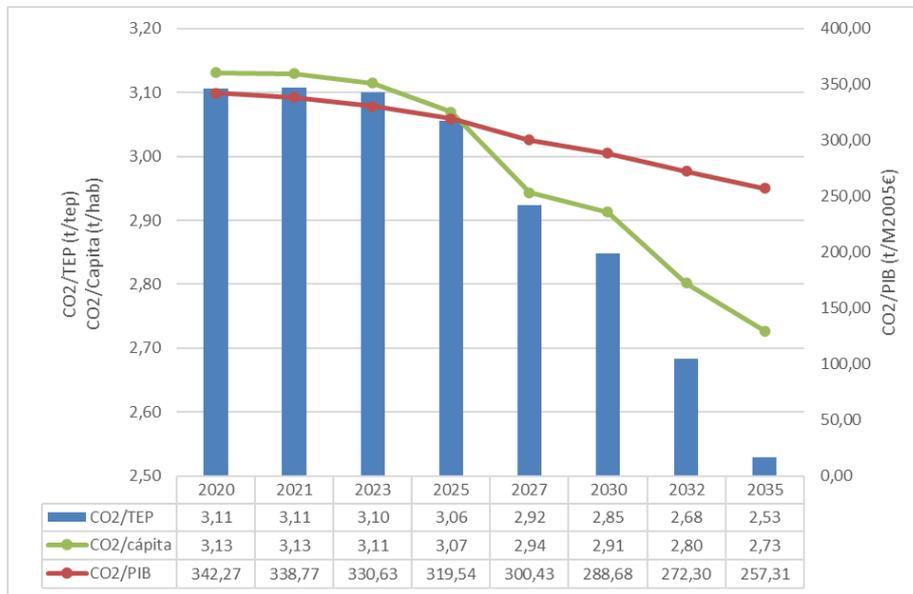


Figura 64: Evolución indicadores ambientales. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, el indicador de CO₂/TEP muestra una disminución con el paso del tiempo, este valor representa las emisiones de carbono por unidad de energía consumida. En este caso, la implementación de las medidas de sostenibilidad logra disminuir este indicador en un 18%. Se puede entender que habrá un mayor consumo energético proveniente de las energías limpias y por ende resulta en un decremento de emisiones a la atmosfera.

Para la situación del indicador de CO₂/cápita muestra las emisiones de carbono por persona en México. El escenario sostenible presenta valores similares en aproximadamente 3,1 durante el 2020, 2021 y 2023. Sin embargo, a partir del pico de incremento de energías renovables en el 2025 presenta una tendencia a la disminución hasta alcanzar un valor de 2,73, es decir, un 12,7% menos para el 2035. Esto significa que el crecimiento poblacional va en aumento, pero disminuyendo las emisiones de carbono a pesar del incremento de la demanda energética.

El indicador de emisiones de carbono en relación con el PIB refleja una tendencia hacia la disminución, donde se tiene un valor 342,27 para el 2020 y que para el 2035 presenta un valor de 257,31. Dando como resultado una disminución del 24,8%. Esto significa que el país seguirá creciendo en su PIB y la demanda de su energía eléctrica es proveniente de energías renovables logrando un consumo sin emisiones de carbono.

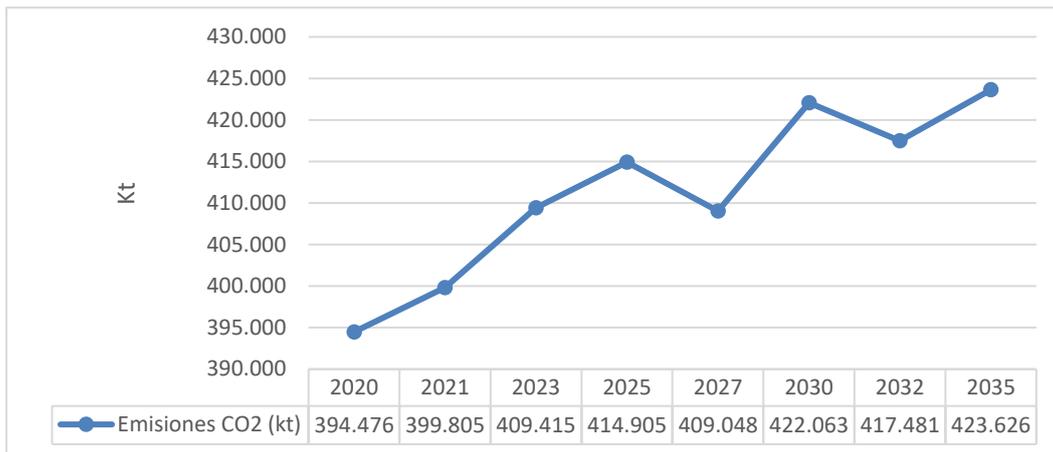


Figura 65: Evolución de indicador ambiental: Emisiones CO₂. Fuente: Elaboración propia

La última gráfica de evolución de los indicadores ambientales representa el comportamiento del indicador de emisiones de carbono, el cual marca una tendencia al crecimiento durante los primeros años, sin embargo, a partir del 2025 se puede ver como las emisiones se comienzan a disminuir. A pesar de esto, se podría decir que la línea de tendencia es constante y que el aumento es de tan solo 7,2% respecto al 2020.

- Socio-económicos

A continuación, se muestra la siguiente gráfica donde se visualiza de manera general las variaciones en los indicadores socio-económicos para el periodo de análisis 2020-2035.

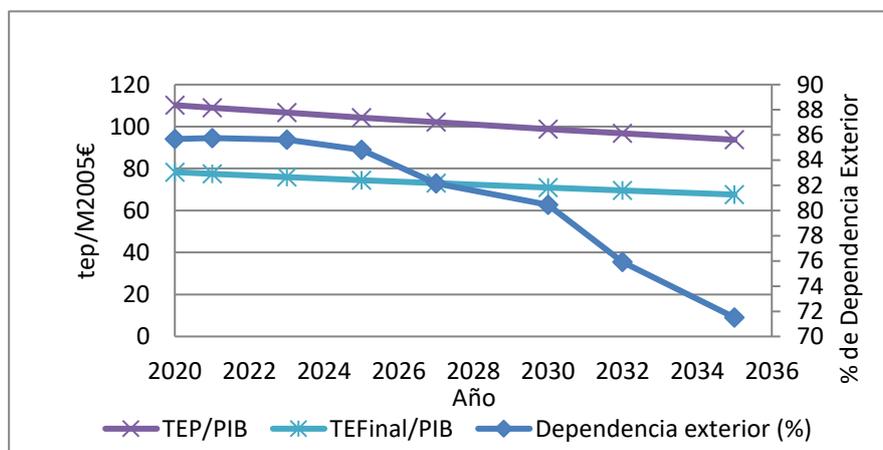


Figura 66: Evolución indicadores socio-económicos. Fuente: Elaboración propia

La Figura 66 muestra la curva de tendencia que presenta México respecto al porcentaje de dependencia exterior, que en este caso se puede observar cómo comienza con un valor del 85% para el 2020, y para finales del análisis se obtiene un 71,45%.

Es importante enfatizar que la reducción respecto a la dependencia exterior es un gran logro para el territorio mexicano ya que colabora a reforzar su soberanía energética al depender menos de países externos en materia energética.

Respecto a los indicadores de TEP/PIB, TEFinal/PIB se puede notar como ambos presentan una tendencia similar en la curva debido a que la energía final consumida depende estrechamente de la energía primaria.

El consumo de energía primaria (carbón, petróleo, gas natural, renovables, nuclear) siempre presentará un valor más alto a la energía final debido al rendimiento eléctrico proveniente del proceso de generación de electricidad.

- Energéticos

Para comenzar se muestran las siguientes gráficas donde se es capaz de visualizar de manera general variaciones en los indicadores energéticos para el periodo de análisis 2020-2035.

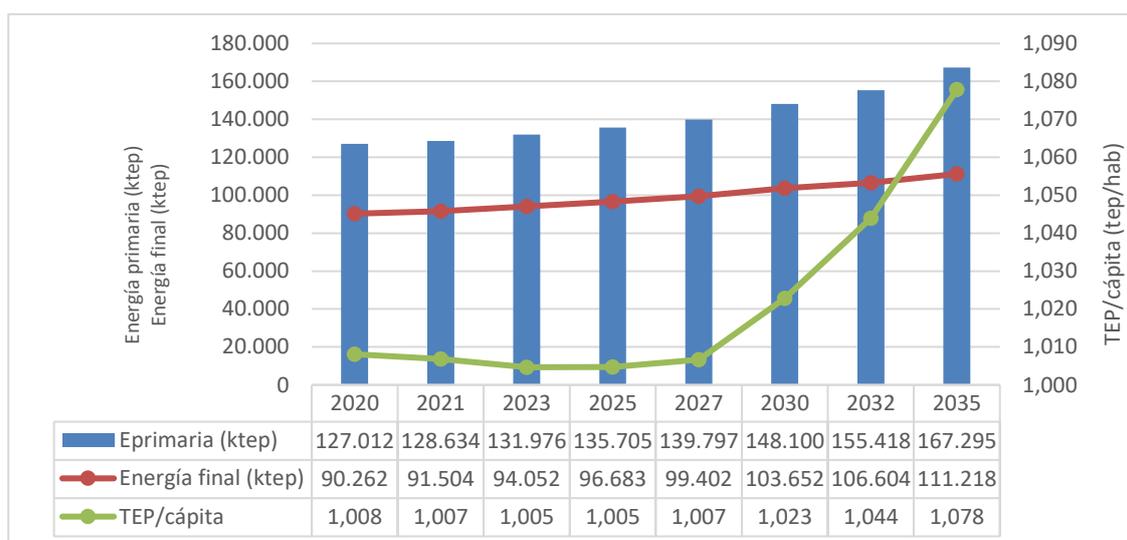


Figura 67: Evolución indicadores energéticos. Fuente: Elaboración propia

La Figura 67 representa el indicador de TEP/cápita, el cual mantiene un comportamiento similar durante todo el análisis con un valor alrededor de 1 TEP/cápita. El cual significa la relación entre el consumo de energía primaria por persona mexicana. Sin embargo, es posible ver una curva de aumento a partir del 2027 debido al consumo ahora de energía eléctrica por parte de los coches eléctricos.

Respecto al indicador de consumo de energía primaria y de energía final, la Figura 75 muestra la curva de tendencia de como ambas van incrementando con el paso del tiempo.

Como se ha mencionado, tiene sentido que ambas muestren la misma tendencia debido a que energía primaria es básicamente las fuentes energéticas antes de su transformación y la energía final se entiende como aquella que es la ya utilizada por el usuario, como la energía eléctrica, la cual pasa por todo el tema de proceso de conversión antes de llegar al usuario final.

Analizando los valores para la energía primaria, se puede entender como en un periodo de 15 años se tiene un aumento del 31% y para el tema de la energía final se puede ver como aumenta un 23%. Los aumentos al consumo energético tiene sentido debido a que la medida de la transición hacia la electromovilidad recae en el aumento del consumo eléctrico.

- Energías Renovables

Para comenzar se muestra la siguiente gráfica donde se es capaz de visualizar de manera general variaciones en el indicador de Energías Renovables para el periodo de análisis 2020-2035.

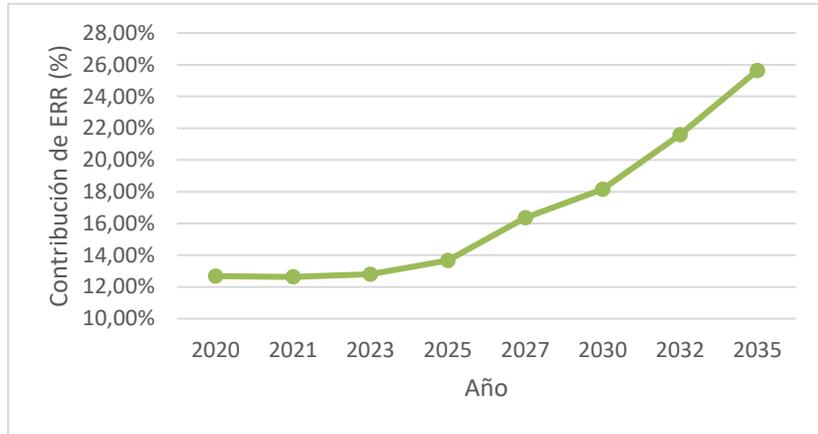


Figura 68: Evolución del indicador Energías renovables. Fuente: Elaboración propia

La Figura 68 muestra el comportamiento del indicador de la contribución de energías renovables respecto al total de la demanda de la energía primaria. Se puede observar claramente que presenta una tendencia positiva del desarrollo de las energías renovables en el territorio, en la cual se comienza con un valor de casi el 13% en el 2020, y que en 15 años continuando su tendencia al aumento resultando en un valor de más del 25% de contribución.

El indicador muestra como la implementación de las energías limpias permiten encaminarse hacia una soberanía energética y al mismo tiempo se contribuye a la disminución de emisiones de carbono.

5.4.1 FUENTES DE ENERGÍA

La matriz energética de México se encuentra compuesta por diversos tipos de fuente de energía, los cuales son: carbón, petróleo, gas natural, renovables y nuclear.

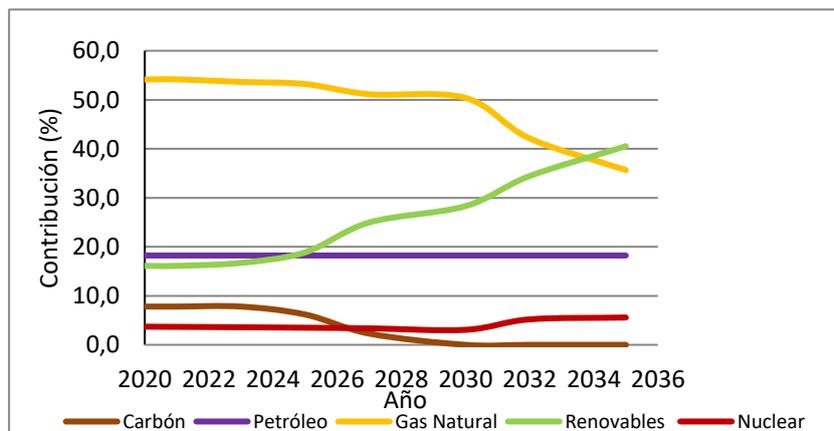


Figura 69: Fuente energéticas para generación de electricidad. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

En términos porcentuales la Figura 69 representa la contribución de cada recurso para la generación de electricidad en México.

A partir de las curvas de tendencia, se puede comprender que el gas natural es el recurso fósil más utilizado en el primer periodo. Sin embargo, a partir de la implementación de medidas de sostenibilidad, se puede observar cómo su utilización se encuentra a la baja, comenzando de un 54% se alcanza una contribución del 35,5% en el 2035.

Se puede notar como el recurso del carbón básicamente desaparece su contribución desde el 2030, esto debido al retiro progresivo de las centrales carboeléctricas.

Para el recurso del petróleo presenta una tendencia estable de contribución debido a la hipótesis planteada en la que se menciona que se va a mantener el mismo porcentaje de contribución proveniente de los recursos.

Por otro lado, para el tema de la energía nuclear se presenta con una pendiente al alza, lo que se le puede atribuir a la apertura de tres reactores nucleares en México para la generación de electricidad.

Finalmente, se puede observar como el tema de las energías renovables se encuentra en crecimiento debido al desarrollo incesante de este tipo de energías en el territorio mexicano, como son plantas eólicas, solares e hidroeléctricas. Analizando los valores, al inicio tan solo el 16% de la energía de México proviene de las energías renovables, sin embargo, al finalizar el trabajo académico se consigue que un 40,6% de la energía eléctrica provenga de energía sin emisiones de carbono.

5.4.2 SECTORES DE ACTIVIDAD

La Figura 70 muestra la relación entre la cantidad de emisiones de carbono provenientes de los diversos sectores (industria, transporte, servicio, doméstico, agricultura y pesca y electricidad) que consumen energéticos en México y por lo tanto emiten CO₂ al medio ambiente.

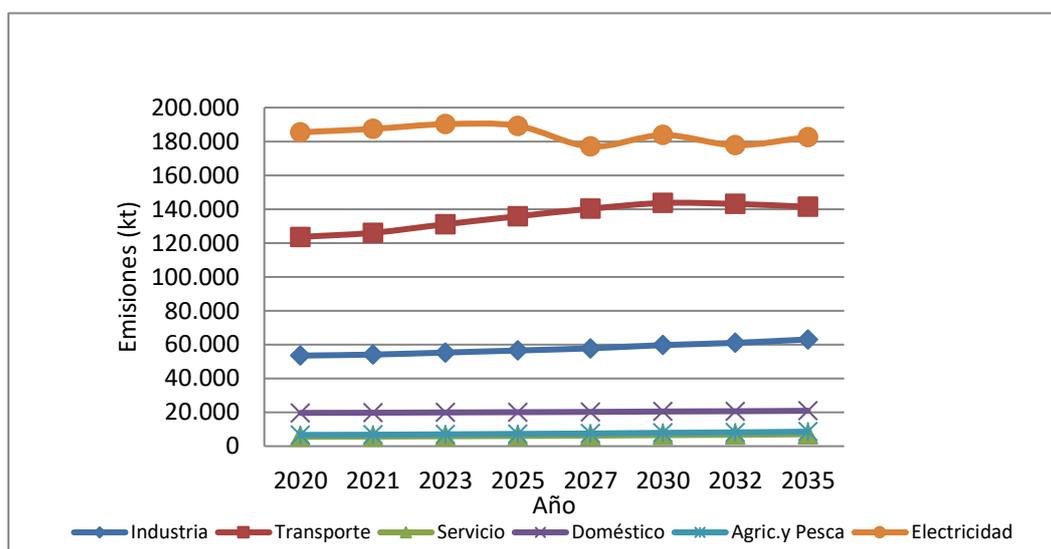


Figura 70: Emisiones de carbono por sector de actividad. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

El sector de electricidad y transporte son los sectores que más contribuyen a las emisiones de carbono en el territorio mexicano de acuerdo con los valores mostrados en la Figura 70.

El sector de electricidad en el 2020 emite 185.438 (kt) CO₂, y durante el periodo de las medidas de sostenibilidad presenta un interesante comportamiento de disminución de emisiones alcanzando 182.210 (kt) CO₂, en términos porcentuales disminuye un 2% la contaminación del sector eléctrico. Se puede atribuir a que a partir del 2035 el 40% de la generación eléctrica proviene de energías limpias.

Por otro lado, es interesante como al lograr una movilidad sustentable por medio de la sustitución de vehículos con combustible fósil por vehículos eléctricos se generan emisiones de tan solo un 14% durante el periodo de análisis. Se puede atribuir el aumento debido al crecimiento de la demanda energética para medios de transporte con combustible fósil.

Con la transición a la electromovilidad definitivamente se muestra un logro positivo respecto a las emisiones, sin embargo, es importante considerar un mayor fomento de este tipo de movilidad para poder obtener mejores cambios o la mejora de los transportes públicos para reducir el uso de coches privados.

Finalmente, para los sectores de industria, domestico, servicio y agricultura y pesca se presenta una tendencia estable respecto al escenario tendencial debido a que se mantienen las mismas hipótesis planteadas por lo que su contribución permanece estable

5.5 CONCLUSIONES SOST

La obtención del escenario sostenible permite establecer la aplicación de medidas de sostenibilidad para poder llevar a cabo los objetivos planificados. En este sentido, el propósito fundamental es la implementación de un 25% de contribución de las energías renovables como energía primaria y reducir las emisiones de carbono al menos un 13%.

En general, un escenario sostenible fomenta el desarrollo de las energías renovables para alcanzar una reducción de las energías basadas en combustibles fósiles con el fin de reducir las emisiones de carbono en el territorio.

Las mejoras planteadas respecto al escenario tendencial se enfocan principalmente en los dos sectores más contaminantes. Primeramente, se encuentra el sector de generación de electricidad proveniente mayormente del gas natural. En segundo lugar, el sector de transporte que consume un 60% de petróleo.

Para el escenario sostenible, se obtiene un 40,6% de participación de las energías renovables como fuente de generación eléctrica para el 2035. Asimismo, se realiza el planteamiento del retiro progresivo de las centrales carboeléctricas porque al carbón se le atribuye el primer lugar como fuente de energía contaminante.

Con el fin de trabajar hacia una seguridad energética, se implementa la instalación de energía nuclear por medio de la instalación de un total de tres reactores ABWR. La construcción de dos reactores localizados en la planta nuclear Laguna Verde y el otro en Monterrey con un total de 4.050 MW de potencia instalada al finalizar el periodo de análisis. Algunas de sus ventajas son la generación de electricidad de forma segura, ininterrumpida y libre de emisiones de dióxido de carbono.

Para la mejora del sector de transporte se plantea la transición hacia la electromovilidad, en la que se enfoca en promocionar el uso de coches eléctricos en vez de coches de combustible fósil.

En cuanto, a la demanda de la energía primaria se consigue disminuir el consumo del petróleo en aproximadamente 6 puntos porcentuales respecto al escenario BAU.

Al finalizar los planteamientos se consigue reducir la demanda del gas natural como fuente de energía primaria alcanzado un 26,3% en la matriz. Entonces, como principal contribuyente se sitúa el petróleo, que como se ha mencionado anteriormente su aplicación principal es en el transporte. Por lo que es importante considerar aplicar medidas de desarrollo sostenible principalmente en este sector, entre las que se pueden mencionar: mejorar el transporte público para que la población decida utilizar este medio en vez de adquirir transporte privado, replantear los hábitos de consumo energético con el objetivo de reducir la demanda.

A través del escenario de desarrollo sostenible se consigue la disminución de emisiones de carbono en un 13% con respecto al escenario tendencial del 2020. Asimismo, la implementación del 25% de energías renovables como fuente de energía primaria genera un gran impacto respecto a la dependencia exterior, en el cual se proyecta un escenario tendencial del 86%, y para el sostenible un 71,45%.

Al trabajo académico se le puede atribuir un desarrollo del territorio mexicano de manera sostenible que al mismo tiempo prioriza la soberanía energética de México.

CAPÍTULO 6. COMPARATIVA BAU VS. SOSTENIBLE

En este apartado, se lleva a cabo una comparación del escenario BAU y el escenario sostenible por medio de figuras 71, 72, 73 y 74 que muestran los indicadores de manera gráfica.

Se presenta del lado izquierdo el escenario tendencial (BAU) y del lado derecho se puede observar el escenario sostenible. De manera general se mencionan las medidas de sostenibilidad aplicadas, las cuales son: Incremento de energías renovables, incremento de la energía nuclear, transición hacia la electromovilidad y el retiro progresivo de centrales carboeléctricas.

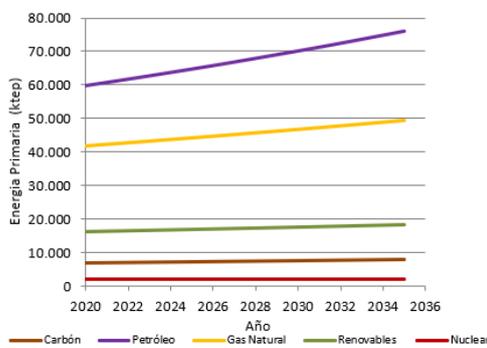


Figura 71: Demanda energía primaria (ktep), escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

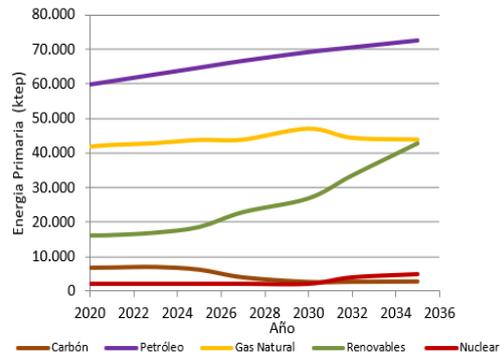


Figura 72: Demanda energía primaria (ktep), escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

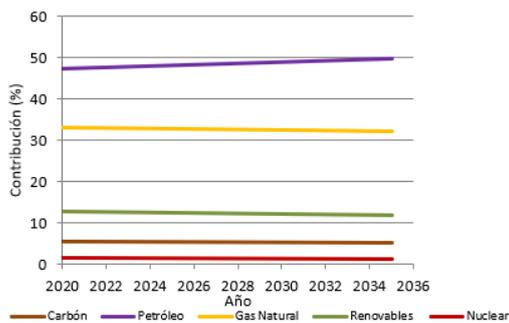


Figura 73: Demanda energía primaria (%), escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

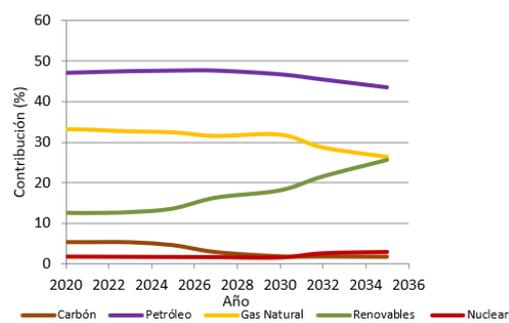


Figura 74: Demanda energía primaria (%), escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

La Figura 71 y 72 representan gráficamente la cantidad de energía consumida (ktep) con respecto a la fuente de energía, y en la Figura 73 y 74 se muestran los consumos energéticos en valores porcentuales considerando el total respecto a cada fuente de energía con el fin de una mejor comprensión del consumo.

La matriz energética de México se encuentra dominada por el petróleo y el gas natural como fuentes de energía. En este sentido, se puede notar como en el 2020, el 33% proviene del gas natural y un 47% del petróleo, es decir, la demanda de energía primaria se abastece de combustibles fósiles a través de todo el periodo tendencial. Por lo que se puede entender, que el escenario BAU proyecta el consumo continuo de estos recursos que ocasionan emisiones de carbono y además incrementan la dependencia exterior.

Para el escenario sostenible, se puede observar como el consumo del petróleo se reduce debido a la medida de transición hacia la electromovilidad, en el que los automóviles de combustible fósil se sustituyen por aquellos que utilizan energía eléctrica proveniente de energías renovables. Al finalizar el periodo de análisis en el 2035, el petróleo muestra una contribución del 43,5% en el sostenible, lo que significa una reducción del 6% respecto al escenario BAU en ese mismo periodo.

El consumo del gas natural se mantiene estable durante 2020 al 2035 en el escenario BAU en un valor de aproximadamente 33%. En comparación con el sostenible, en el cual presenta un comportamiento hacia la baja alcanzando un 26% para el 2035, esto se puede atribuir al desarrollo de las energías renovables en el país con el fin de reducir el consumo del gas natural como fuente de generación de electricidad.

Similar al comportamiento del gas natural, se tiene el recurso del carbón en el cual se reduce su consumo por la medida del retiro progresivo de centrales carboeléctricas en México, obteniendo una contribución de tan solo 1,6% en el escenario sostenible.

La contribución de energías renovables en el escenario tendencial se encuentra marcado por un valor estable de aproximadamente 12% como fuente de energía primaria. Sin embargo, en el escenario sostenible se desarrollan alcanzando una contribución del 25,7% total en la matriz energética, por lo que se convierten en una fuente de energía importante para el territorio mexicano.

El apoyo de la nuclear proviene de la apertura de los reactores en el que se les atribuye un incremento de aproximadamente 1% más de su contribución para el escenario sostenible.

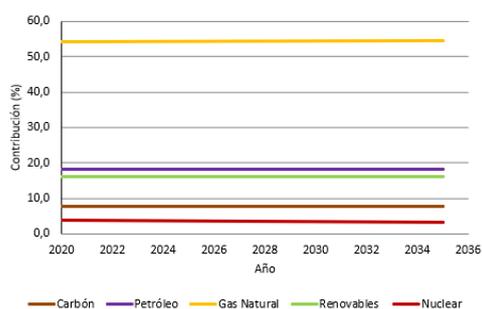


Figura 75: Generación de electricidad, escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

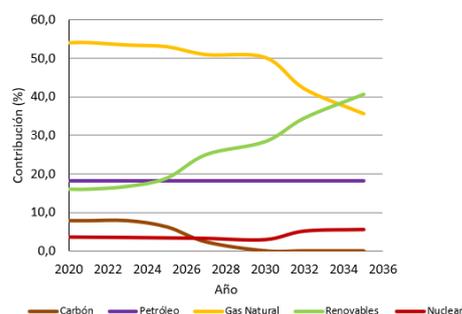


Figura 76: Generación de electricidad, escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

Las Figuras 75 y 76 representan los recursos energéticos utilizados para la generación de electricidad respecto a su contribución total en porcentajes.

Considerando la información presentada, se puede observar como la demanda del gas natural se reduce drásticamente en el escenario sostenible, en el cual tan solo 35,5% de la generación de electricidad proviene de este recurso. En comparación con el BAU en el cual se tiene un impacto de más del 50%.

Las energías renovables presentan un estado desalentador en el escenario BAU debido a que contribuyen en tan solo un 16% en el tema de generación. Para el escenario sostenible se convierten en el primer recurso energético para generación de electricidad, obteniendo un valor del 40,6%. Por lo que se puede entender que su crecimiento es positivo debido a que permiten un desarrollo sin emisiones de carbono.

La demanda del petróleo se mantiene estable debido las hipótesis planteadas. El consumo de carbón se mantiene estable en el BAU ocasionado emisiones de carbono, pero para el escenario sostenible se elimina su utilización a través del cierre de las centrales de carbón en México a partir del 2030.

En el tendencial se observa como la energía nuclear permanece constante en alrededor del 3%. Para el escenario sostenible se tiene un ligero aumento del aporte por parte de la energía nuclear de un 5,6% para el 2035.

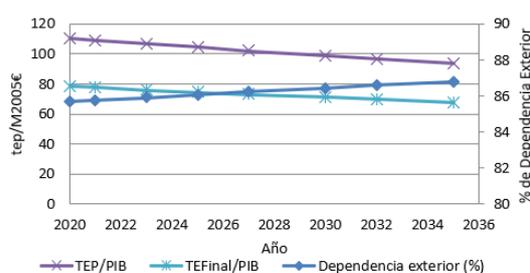


Figura 77: Evolución indicadores socioeconómicos, escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

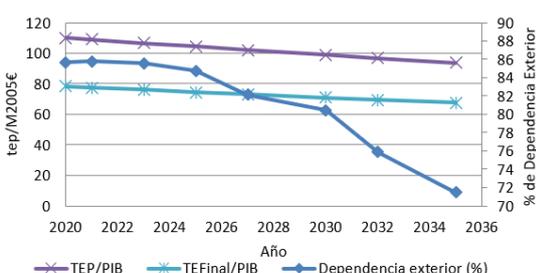


Figura 78: Evolución indicadores socioeconómicos, escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

Las Figuras 77 y 78 representan el comportamiento de los indicadores socioeconómicos, en los cuales se tienen el TEP/PIB, TEFinal/PIB y el indicador de dependencia exterior (%).

En el escenario BAU el porcentaje de dependencia exterior (%) se mantiene entre 85%-87% durante el periodo 2020-2035. En el escenario sostenible presenta una tendencia totalmente distinta en el que el valor del indicador va disminuyendo, en términos porcentuales alcanza alrededor de un 71,45% para el final del desarrollo sostenible en el 2035. Este comportamiento se le puede atribuir al incremento de las energías renovables como fuente de generación eléctrica, en el que por lo tanto se disminuye el consumo de gas para este propósito, reduciendo así las importaciones de energía del gas natural.

En cuanto a los indicadores TEP/PIB y TEPfinal/PIB, se puede observar que ambos tienen tendencias similares en las curvas, ya que el consumo de energía final depende en gran medida de la energía primaria.

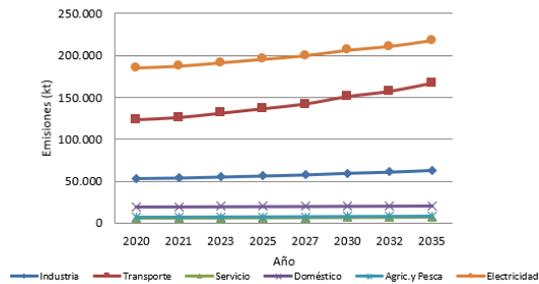


Figura 79: Emisiones (kt) por sectores, escenario BAU. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

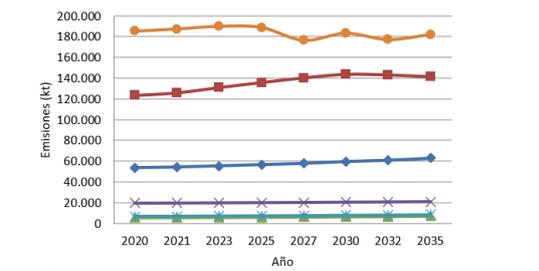


Figura 80: Emisiones (kt) por sectores, escenario sostenible. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

En ambos escenarios, los principales sectores emisores de carbono son el de generación eléctrica y el del transporte. En este sentido, son en los que se implementa el desarrollo sostenible con el fin de reducir las emisiones.

Se puede observar como en el escenario BAU el sector electricidad alcanza alrededor de 220.000 (kt) de emisiones de carbono para el 2035. A partir de las medidas implementadas en el sostenible ni siquiera se alcanza un valor encima de las 200.000 (kt) de emisiones de carbono. Entonces, se puede concluir como se disminuyen un 16,35% de CO₂ respecto al escenario tendencial al finalizar el periodo de análisis 2020-2035.

El sector de transporte también presenta una tendencia similar de reducción de emisiones de carbono. El escenario BAU muestra como definitivamente las emisiones aumentan sino se realizan propuestas de mejora en el sector, por lo mismo, se propuso la implementación de autos eléctricos para reducir el consumo del petróleo y por ende las emisiones de este recurso.

El escenario del transporte tiene un aumento porcentual de casi un 35% durante el periodo de análisis alcanzando emisiones de 166.333 (kt) CO₂ para el 2035. A diferencia de esto, en el escenario sostenible se consigue una disminución de casi 15% respecto al tendencial en el 2035, en el que tan solo se obtienen 141.412 (kt) CO₂.

Los sectores de industria, servicio, agricultura y pesca y domestico presentan el mismo comportamiento en ambos escenarios porque las medidas de sostenibilidad son enfocadas en los dos sectores más contaminantes (electricidad y transporte).

Por último, se realiza una tabla donde se muestran los resultados del análisis del trabajo académico para comprobar el cumplimiento de objetivos de sostenibilidad planteados.

Tabla 31: Resumen de los resultados de sostenibilidad obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

Objetivo	Escenario BAU	Escenario sostenible	Comportamiento Positivo
25% de Energías Renovables como fuente primaria.	11,8%	25,7%	↑
Reducir un 13% las Emisiones de Carbono	483.803 ktep	423.249 ktep	↓
	100%	87%	
40% de Generación Eléctrica a partir de Renovables	16,1%	40,6%	↑
Disminuir del 86% a un 72% la dependencia exterior	86%	71,45%	↓

Recordando los objetivos planteados, los cuales son la implementación de un 25% de energías renovables como fuente primaria, reducir un 13% las emisiones de carbono, generar un 40% de la energía eléctrica a partir de las renovables y disminuir la dependencia exterior de un 86% al 72%, los objetivos son planteados respecto al tendencial (BAU).

A través de la Tabla 31 se puede entender como se cumplieron satisfactoriamente los objetivos de sostenibilidad por medio de la aplicación de las medidas.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

El presente trabajo académico se lleva a cabo con el propósito de analizar, evaluar y proponer medidas para el desarrollo sostenible para hacer frente a la demanda energética del territorio mexicano durante el periodo 2020-2035. Para su realización, se consideran los compromisos internacionales que el gobierno de México ha asumido, como son la Agenda 2030 y el acuerdo de París.

México es un país energéticamente dependiente de energías no renovables, mayormente el petróleo, gas y el carbón. Y es interesante notar durante el análisis realizado como la mayor contaminación proviene del sector de generación eléctrica y el de transporte. Los cuales emiten el principal causante del cambio climático, el dióxido de carbono, el cual proviene de los compuestos energéticos anteriormente mencionados.

El país presenta desafíos económicos, ambientales y sociales para avanzar hacia una transición energéticamente sostenible para disminuir emisiones de carbono, y al mismo tiempo avanzar hacia un país soberano energéticamente.

En este sentido, se realiza el análisis de la matriz energética de México para obtener una clara predicción del escenario energético tendencial BAU con el propósito de hacer frente al futuro y ser capaces de darle una solución sostenible a través del desarrollo del escenario sostenible.

El escenario BAU predice el comportamiento tendencial de México en materia energética. El cual sugiere que el país presenta una tendencia de aumento de la dependencia exterior (%) esto debido al aumento de la demanda energética proveniente de los combustibles fósiles (gas, petróleo). Por lo tanto, en este escenario es inevitable el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por los recursos fósiles, y al mismo tiempo se contribuye al cambio climático.

El escenario sostenible propone una transición energética a través de la diversificación de recursos para poder hacer frente a la demanda energética, reducir la dependencia exterior y disminuir las huellas de carbono. Es ahí donde las energías renovables tienen un papel fundamental para cumplir con los objetivos planteados.

La implementación de energías verdes en el país genera un beneficio ambiental, social y económico. Respecto al económico, permite impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías, asentamiento de nuevas empresas que socialmente se pueden entender como nuevas fuentes de generación de empleos. En temas ambientales se reducen las emisiones al utilizar fuentes de energía renovables como se ha comprobado a través de este presente trabajo académico.

La mejora del modelo energético tiene muchas ventajas, entre ellas una seguridad de suministro hacia la ciudadanía, reducir la dependencia de las importaciones, ser capaz de reducir el costo de la electricidad y mejorar la eficiencia del sistema energético.

Las medidas planteadas son desarrolladas en los dos sectores más contaminantes, los cuales son el sector de la generación eléctrica y el del transporte. Las cuales incluyen el incremento de las energías renovables, transición hacia la electromovilidad, incremento de la energía nuclear y la sustitución del carbón como fuente de generación eléctrica.

Como recomendación es posible considerar medidas sostenibles para los otros sectores estableciendo medidas de eficiencia energética tanto en el sector industrial, agricultura y pesca, doméstico y de servicios. A manera de ejemplo, el sector industrial y doméstico la propuesta radicaría en la implementación de auditorías energéticas para poder proponer mejoras en los equipos utilizados con el fin de lograr un ahorro de energía eléctrica.

Para concluir, el territorio mexicano enfrenta un gran reto en materia energética, el cual radica en que la política energética logre una alineación con los compromisos internacionales para poder llevar a cabo la transición energética donde se fomente el uso de las energías renovables como piezas clave para el desarrollo del país y asimismo reducir el consumo de los recursos fósiles y disminuir las emisiones de carbono.

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- A., L. (02 de Junio de 2017). *CIEP*. Obtenido de <https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>
- Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo. (2017). *GIZ*. Obtenido de <https://www.giz.de/en/worldwide/75618.html>
- Banco Mundial. (04 de Abril de 2023). *Banco Mundial*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/country/mexico/overview>
- Banco Santander. (2023). *Santandertrade*. Obtenido de <https://santandertrade.com/es/portal/analizar-mercados/mexico/cifras-comercio-exterior>
- C., M. (2023). Política energética y descarbonización en México. El caso de la Región de Control central.
- CEMIE. (2018). *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Obtenido de <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros/CEMIE-HIDRO-02.pdf>
- Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). (2020). *Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y RGD 2020 - 2034.pdf* ([cenace.gob.mx](https://www.cenace.gob.mx)). Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de https://www.cenace.gob.mx/Docs/10_PLANEACION/ProgramasAyM/Programa%20de%20Ampliaci%C3%B3n%20y%20Modernizaci%C3%B3n%20de%20la%20RNT%20y%20RGD%202020%20-%20202034.pdf
- CFE. (2020). *Comisión Federal de Electricidad*. Obtenido de <https://www.cfe.mx/cdn/2019/Archivos/Boletines/Mamparas%20BCS.pdf>
- CFE. (17 de Noviembre de 2021). *Comisión Federal de Electricidad*. Obtenido de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2389>
- CFE. (14 de Julio de 2021). *Comisión Federal de Electricidad*. Obtenido de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2219#:~:text=El%20Plan%20de%20Modernizaci%C3%B3n%20de,de%20obra%20y%20problem%C3%A1ticas%20socioambientales>.
- CFE. (12 de Junio de 2021). *Comisión Federal de Electricidad* . Obtenido de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2194>
- CFE. (03 de Marzo de 2022). *CFE*. Obtenido de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2482>
- CFE. (14 de Abril de 2022). *CFE*. Obtenido de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2502>

Ciencia UNAM-DGDC. (03 de Junio de 2022). *Ciencia UNAM*. Obtenido de <https://ciencia.unam.mx/leer/1268/energia-nuclear-usos-y-desafios->

Comisión Federal de Electricidad. (14 de Abril de 2022). *CFE*.

Comisión Federal de Electricidad. (s.f.). *cfe*. Recuperado el 07 de Octubre de 2023, de <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/Pages/queeslacfe.aspx>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (1999). *CONABIO*.

COPARMEX. (28 de Julio de 2022). *COPARMEX Nuevo León*. Obtenido de <https://coparmexnl.org.mx/2022/07/28/nl-el-gran-consumidor-de-energia-electrica/#:~:text=De%20acuerdo%20a%20un%20an%C3%A1lisis,16%20mil%20gigawatts%20por%20hora.>

D., M. (16 de Junio de 2023). *Normas Ambientales*. Obtenido de <https://normasambientales.com.mx/infoblog/tabla/tabla-de-rendimiento-de-combustible-2021.html#:~:text=En%20resumen%2C%20el%20consumo%20de,por%20cada%20100%20kil%C3%B3metros%20recorridos.>

De Alba E. y Reyes M. (s.f.). El país. En *El país*. Obtenido de http://www.conabio.gob.mx/institucion/estudio_pais/CAP1.PDF

E., C. (2006). *Asociación de Energía Solar*. Obtenido de <https://anes.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/InvestigacionyDesarrolloDeLaEnergiaEolicaEnMexico.pdf>

E., P. (2023).

ENGIE México. (2021). *ENGIE*. Obtenido de <https://solinsurgentes.com/proyecto>

Enlight. (07 de Febrero de 2023). *Enlight*. Obtenido de <https://www.enlight.mx/blog/energia-solar-perspectiva-2023-en-mexico-y-el-mundo>

Environmental Justice Atlas. (18 de Agosto de 2019). *Los Pescados River hydroelectric project in Veracruz, Mexico*. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de Environmental Justice Atlas: <https://ejatlas.org/print/los-pescados-river-hydroelectric-veracruz>

ERM MEXICO, S.A DE C.V. (Mayo de 2017). *SEMARNAT*. Obtenido de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/mor/estudios/2017/17MO2017ED009.pdf>

Foro Nuclear. (2023). Obtenido de https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2023/06/Energia_2023_PDF.pdf?x28294

García, J., Bejarano, R., & Calderón, A. (12 de Noviembre de 2018). *Formulación de proyecto de aumento de potencia de la Central Hidroeléctrica Boquilla ubicada en el municipio de San Francisco de Conchos, Chihuahua*. INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY, CAMPUS CHIHUAHUA, Chihuahua. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/631639?locale-attribute=es>

Global solar atlas. (2024). *Global solar atlas*. Obtenido de <https://globalsolaratlas.info/map?r=MEX&c=-15.792254,177.890625,2>

- Global Wind Atlas. (2024). *Global Wind Atlas*.
- Gobierno de México. (20 de Mayo de 2022). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agn/es/articulos/precursores-de-la-investigacion-en-energia-solar-en-mexico-la-mirada-de-pablo-mulas-y-el-centro-de-ecodesarrollo?idiom=es>
- Gómez A., R. R. (2005). ABWR, una opción para la Generación Eléctrica en México . *XVI Congreso Anual de la SNM y XXIII Reunión Anual de la SMSR*, 15. Obtenido de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/073/36073987.pdf
- INEGI. (2012). *Lo que indican los indicadores. Cómo utilizar la información estadística para entender la realidad económica de México*. Obtenido de <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/11/5238/8.pdf>
- INEGI. (2020). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- INEGI. (s.f.). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. (2017). *1era Parte: Infraestructura Hidroeléctrica Actual* /. México.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2018). Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/341706/IT_TERMOSOLAR_Final_Rev_1.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). *Metodología para la identificación y cuantificación de acciones de mitigación por la generación distribuida de energía eléctrica a través de sistemas fotovoltaicos con capacidades menores a 500kW y con conexión a red*. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/681992/105_2020_Metodologia_identificacion_500kw_conexion_a_red.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). *Reducción de emisiones asociadas al programa de modernización y rehabilitación de centrales hidroelectricidad en México*. Ciudad de México. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/829557/06_2023_Informe_de_las_estimaciones_de_hidroelectricas_220523.pdf
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2006). *Minicentrales hidroeléctricas*. Madrid. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de <https://www.idae.es/publicaciones/minicentrales-hidroelectricas>
- International Energy Agency. (18 de Agosto de 2022). *IEA*. Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=MEXICO&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>
- IRENA. (Octubre de 2019). *IRENA*. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf
- J., L. (03 de Diciembre de 2021). *Organismo Internacional de Energía Atómica*. Obtenido de <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>

- JA SOLAR. (2023). *Premium Cells, Premium modules*. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de <https://www.jasolar.com/uploadfile/2023/0816/20230816040413818.pdf>
- K., O. (05 de Mayo de 2021). *Universidad Virtual de la Universidad de Guadalajara*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/280/28068276020/html/>
- Liñan, K. (12 de Enero de 2023). *Cámara Periodismo Legislativo*. Obtenido de <https://comunicacionsocial.diputados.gob.mx/revista/index.php/pluralidad/las-politicas-energeticas-de-mexico-para-2023>
- M., G. (2022). *Organismo Internacional de Energía Atómica*. Obtenido de <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/estad%C3%ADsticas-pris-energia-nuclear-2021>
- Mexico Energy Partners. (2021). Obtenido de <https://mexicoenergyllc.com.mx/es/blogs/mexico-energy-insights/keys-to-success-for-wind-energy-in-mexico#:~:text=La%20capacidad%20e%C3%B3lica%20instalada%20acumulada,central es%20el%C3%A9ctricas%20en%2015%20estados>.
- Noticias ONU. (01 de Abril de 2019). *Naciones Unidas*. Obtenido de <https://www.un.org/es/desa/commission-on-population-and-development52>
- Observatorio de Inteligencia del Sector Energético. (2022). Obtenido de <https://www.oise.mx/eolica>
- Ocampo, O. (01 de Septiembre de 2022). *IMCO*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2023, de <https://imco.org.mx/gas-natural-para-la-seguridad-energetica-de-mexico/#:~:text=Hoy%2C%20Estados%20Unidos%20provee%20aproximadamente,energ%C3%A9ticos%20en%20Am%C3%A9rica%20del%20Norte>.
- P., T. (2023). *Forbes México*. Obtenido de <https://www.forbes.com.mx/energia-eolica-marina-para-cuando-en-mexico/>
- Palacios, A., Peña, N., Cervantes, E., Güitrón, A., & López, M. (20 de Diciembre de 2017). *1era parte: Infraestructura Hidroeléctrica Actual*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros/Potencial-Hidroelectrico-Mexico-1era-Parte.pdf>
- PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. (2022). *JRC PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. Obtenido de https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/
- Potencia natural. (2008). *Potencia natural*. Obtenido de <https://www.potencianatural.com.mx/energia/Articulos/marzo2008/Bazanmarzo2008.htm>
- Power Technology. (01 de Agosto de 2023). *Power Technology*. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de <https://www.power-technology.com/marketdata/power-plant-profile-la-toba-solar-pv-park-mexico/>

- ProMéxico. (2017). Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_M_xico-compressed.pdf
- R., T. (17 de Junio de 2020). *SCIELO*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-952X2019000100109
- Renault. (2021). *Renault*. Obtenido de <https://www.renault.com.mx/blog/tips/kilometraje-promedio-anio.html>
- S., D. C. (06 de Diciembre de 2021). *Las empresas verdes*. Obtenido de <https://lasempresasverdes.com/parques-eolicos-marinos-una-oportunidad-por-explorar-en-mexico/>
- S., G. (2019). *EcoTec*. Obtenido de <https://www.polea.org.mx/contenido/eventos/29/ppt/7.pdf>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural . (12 de Noviembre de 2019). Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/biomasa-creacion-ecologica-de-energia#:~:text=Es%20una%20fuente%20importante%20de,y%20municipios%20del%20territorio%20nacional.&text=La%20biomasa%20fue%20la%20fuente,el%20uso%20de%20combustibles%20f%C3%B3siles>.
- Secretaría de Economía. (Enero de 2020). Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564112/Carb_n_2020__ENE_.pdf
- Secretaría de Energía. (2019). *Programa del desarrollo del sistema eléctrico nacional 2019-2033*. Recuperado el 10 de Octubre de 2023, de <https://www.gob.mx/sener/articulos/prodesen-2019-2033-221654>
- Secretaría de Energía. (2021). *SEMARNAT*. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2021/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D2_ENERGIA/D2_R_ENERGIA01_01.htm#:~:text=Para%20este%20Balance%20se%20consideran,de%20ca%C3%B1a%20le%C3%B1a%20y%20biog%C3%A1s
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (22 de Octubre de 2021). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programa-de-prueba-del-sistema-de-comercio-de-emisiones-179414#:~:text=La%20meta%20de%20contribuci%C3%B3n%20comprometida,al%20apoyo%20y%20financiamiento%20internacional>.
- Secretaria de Relaciones Exteriores. (Octubre de 2013). *Secretaria de Relaciones Exteriores*. Obtenido de <https://embamex.sre.gob.mx/republicadominicana/index.php/avisos/2-uncategorised/127-informacion-general-sobre-mexico>
- SENER. (Octubre de 2020). *SENER*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/610964/Cap10_-_Marco_Juridico_Reporte_Avance_de_Energias_Limpias_WEB.pdf
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564112/Carb_n_2020__ENE_.pdf

- Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *Gobierno de México*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Energia-nuclear.html
- Servicio Geológico Mexicano. (03 de Febrero de 2023). Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Petroleo-en-Mexico.html
- Sheinbaum C., R. V. (03 de Marzo de 2009). *SCIELO*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362009000300006
- Solunion Mexico. (26 de Octubre de 2023). *Solunion*. Obtenido de <https://www.solunion.mx/blog/estado-del-sector-energetico-en-mexico-en-2023/>
- Statista. (07 de Septiembre de 2023). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/711610/ranking-mundial-de-los-principales-paises-emisores-de-gases-de-efecto-invernadero/>
- Ubierna, M., & Alarcon, A. (2022). *Modernización de centrales hidroeléctricas*. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Energía. Recuperado el 22 de Octubre de 2023, de <https://publications.iadb.org/es/modernizacion-de-centrales-hidroelectricas-identificacion-de-beneficios-barreras-y-recomendaciones>
- United Nations Treaty Collection. (12 de Diciembre de 2015). *United Nations Treaty Collection*. Obtenido de https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en&_gl=1*15eb0f1*_ga*MTA1MDU0MTAxOC4xNzEwNTYxMzEy*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcxMDc4ODA1MC4yLjAuMTcxMDc4ODA1MC4wLjAuMA..

CAPÍTULO 9. ANEXOS

9.1 MÉTODO DE CÁLCULO (EXCEL)

Para la realización de la aplicación de las medidas de sostenibilidad en la hoja de cálculo, se resume la evaluación cuantitativa en términos energéticos (ktep) a partir de la siguiente tabla.

Tabla 32: Evaluación de las medidas de sostenibilidad aplicadas en ktep. Fuente: Elaboración propia

Año / ktep	Energías renovables (generación eléctrica)	Energía nuclear	Retiro progresivo de centrales carboeléctricas	Transición a la movilidad eléctrica
2023	365,05	0	0	12,44
2025	1302,30	0	939,6	169,33
2027	3830,10	0	3357,5	304,80
2030	2308,87	0	651,2	1524,03
2032	4649,65	1830,23	0	1862,71
2035	5311,50	915,12	0	3048,07

La Tabla 32 representa todas las medidas implementadas durante el desarrollo del trabajo académico, por lo que a continuación se explican los valores de la tabla.

La columna de Energías renovables muestra el aumento de las energías limpias referente a las nuevas plantas hidroeléctricas, eólicas y fotovoltaicas que se pusieron en marcha en el periodo de tiempo determinado. Asimismo, para la energía nuclear se muestran la cantidad de energía (ktep) que representa la apertura de las plantas nucleoeeléctricas a partir del año 2032.

Por otro lado, para la medida del retiro de centrales de carbón se muestra la cantidad de energía (Ktep) que es disminuida por su retiro progresivo, lo que significa que el consumo de carbón que se realiza para la generación eléctrica con carbón es detenido y sustituido por las energías renovables, como es explicado en la medida anterior.

Por último, para la medida de la transición hacia la movilidad eléctrica se explica la cantidad de energía (ktep) que se disminuye debido a la sustitución de autos de combustible fósil, y en este caso se considera un cambio hacia coches eléctricos.

Para comenzar, se muestra la hoja de cálculo del año 2020.

SECTOR	CONTRIBUCIÓN (ktep): AÑO 2020						Total	%
	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear		
Industria	12.193	2.308	4.798	10.155	1.295	0	30.748	34
ktep	40	8	16	33	4	0		
%								
Transporte	88	0	36.108	39	0	0	36.235	40
ktep	0	0	100	0	0	0		
%								
Servicios	2.282	0	1.432	204	142	0	4.061	4
ktep	36	0	35	5	4	0		
%								
Doméstico	5.124	0	5.180	558	5.423	0	16.285	18
ktep	31	0	32	3	33	0		
%								
Agric. Y Pesca	1.043	0	1.889	0	0	0	2.933	3
ktep	36	0	64	0	0	0		
%								
Gen. Electricidad		4.462	10.415	30.931	9.209	2.119	57.136	
ktep		8	18	54	16	4		
%								
Total fuente	20.730	6.770	59.824	41.887	16.068	2.119		
ktep								
Saldo eléctrico	345							
ktep								
Electricidad generada	20.385							
ktep								
Total E. Primaria							127.012	
ktep								
%	0	5	47	33	13	2		
Total E. final							90.262	
ktep								

Figura 81: Contribución por sectores en el 2020. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

Como se puede observar en la Figura 81, se muestra la contribución de cada sector respecto al consumo energético para el año 2020. En este caso en específico, se mantienen los mismos valores que se obtuvieron a partir del escenario BAU porque las medidas de sostenibilidad comienzan a implementarse a partir del periodo 2023. Sin embargo, se inicia desde este periodo debido a que la información recabada por parte de la Agencia Internacional de Energía se encuentra actualizada hasta este periodo.

A continuación, se presenta la hoja de cálculo para el año 2021.

SECTOR	CONTRIBUCIÓN (ktep): AÑO 2021						Total	%
	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear		
Industria	12.327	2.333	4.851	10.267	1.309	0	31.086	34
%	40	8	16	33	4	0		
Transporte	90	0	36.831	40	0	0	36.960	40
%	0	0	100	0	0	0		
Servicio	2.318	0	1.455	207	145	0	4.126	5
%	56	0	35	5	4	0		
Doméstico	5.145	0	5.201	560	5.444	0	16.350	18
%	31	0	32	3	33	0		
Agric.y Pesca	1.061	0	1.922	0	0	0	2.983	3
%	36	0	64	0	0	0		
Gen. Electricidad		4.508	10.523	31.273	9.304	2.119	57.726	
%		8	18	54	16	4		
Total fuente	20.941	6.841	60.782	42.346	16.201	2.119		
Saldo eléctrico	345							
Electricidad generada	20.596							
Total E. Primaria							128.634	
%								
Total E Final							91.504	

Figura 82: Contribución por sectores en el 2021. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

Como se puede observar en la Figura 82, se muestra la contribución de cada sector respecto al consumo energético para el año 2021. En este caso específico, se obtienen los consumos energéticos a partir de los ritmos de crecimiento determinados anteriormente. Se mantienen los mismos valores porque las medidas comienzan a implementarse a partir del periodo 2023.

A continuación, se presenta la hoja de cálculo para el año 2023.

SECTOR	CONTRIBUCIÓN (ktep): AÑO 2023						Total	%
	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear		
Industria	12.599	2.385	4.958	10.494	1.338	0	31.774	34
%	40	8	16	33	4	0		
Transporte	105	0	38.306	41	0	0	38.453	41
%	0,3	0	99,6	0	0	0		
Servicio	2.393	0	1.502	214	149	0	4.258	5
%	56	0	35	5	4	0		
Doméstico	5.186	0	5.242	564	5.488	0	16.481	18
%	31	0	32	3	33	0		
Agric.y Pesca	1.098	0	1.987	0	0	0	3.085	3
%	36	0	64	0	0	0		
Gen. Electricidad		4.605	10.748	31.628	9.862	2.119	58.962	
%		8	18	54	17	4		
Total fuente	21.382	6.989	62.745	42.942	16.837	2.119		
Saldo eléctrico	345							
Electricidad generada	21.037							
Total E. Primaria							131.976	
%								
Total E Final							94.052	

Figura 83: Contribución por sectores en el 2023. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

La Figura 83 muestra la contribución de cada sector respecto al consumo energético para el año 2023. Los valores en los que se aplican las medidas de sostenibilidad se encuentran en color rojo. Durante este periodo se comienza la implementación del aumento de las energías renovables para generar energía eléctrica y la sustitución de los coches de combustible fósil por los coches eléctricos.

En el escenario tendencial, las energías renovables tienen un valor de 9.497 ktep y debido al aumento de generación eléctrica a través del uso de energías limpias se presenta una contribución de 365,05 ktep. Por lo que se obtiene una contribución total de 9.862 ktep producidas por renovables.

Para realizar la transición hacia la electromovilidad, es necesario realizar una disminución del consumo de petróleo y al mismo tiempo un aumento para el consumo de electricidad para el sector transporte. El escenario tendencial muestra un consumo de 38.319 ktep de petróleo por

parte del sector de transporte, se tiene una disminución de 12,44 ktep debido a los 13.523 coches existentes de la flotilla actual de México en el 2023. Simultáneamente, se aumenta el consumo de energía eléctrica de 12,44 ktep para el sector de transporte debido a que los coches son eléctricos.

A continuación, se presenta la hoja de cálculo para el año 2025.

SECTOR	CONTRIBUCIÓN (ktep): AÑO 2025						Total	%
	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear		
Industria	ktep 12.878	2.437	5.068	10.726	1.367	0	32.477	34
	% 40	8	16	33	4	0		
Transporte	ktep 279	0	39.684	43	0	0	40.006	41
	% 1	0	99	0	0	0		
Servicio	ktep 2.470	0	1.651	221	154	0	4.396	5
	% 56	0	35	5	4	0		
Doméstico	ktep 5.228	0	5.284	569	5.532	0	16.613	17
	% 31	0	32	3	33	0		
Agric.y Pesca	ktep 1.135	0	2.056	0	0	0	3.191	3
	% 36	0	64	0	0	0		
Gen. Electricidad	ktep	3.758	11.059	32.282	11.450	2.119	60.668	
	%	6	18	53	19	3		
Total fuente	ktep 21.990	6.196	64.702	43.841	18.503	2.119		
Saldo eléctrico	ktep 345							
Electricidad generada	ktep 21.646							
Total E. Primaria							135.705	
Total E Final							96.683	

Figura 84: Contribución por sectores en el 2025. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

La Figura 84 muestra la contribución de cada sector respecto al consumo energético para el año 2025. Los valores en los que se aplican las medidas de sostenibilidad se encuentran en color rojo. Durante este periodo se comienza la implementación del aumento de las energías renovables para generar energía eléctrica, la sustitución de los coches de combustible fósil por los coches eléctricos y retiro progresivo de centrales carboeléctricas.

Para realizar la transición hacia la electromovilidad, es necesario realizar una disminución del consumo de petróleo y al mismo tiempo un aumento para el consumo de electricidad para el sector transporte. El escenario tendencial muestra un consumo energético de 39.854 ktep de petróleo por parte del sector de transporte, se tiene una disminución de 169,33 ktep debido a la estimación de 184.062 coches eléctricos. Simultáneamente, se aumenta el consumo de energía eléctrica de 169,33 ktep para el sector de transporte debido a que los coches son eléctricos, es decir, su consumo energético es por medio de la electricidad.

Asimismo, la aplicación de la medida del retiro progresivo de centrales carboeléctricas comienza a activarse por medio de la reducción del 20% de producción eléctrica por carbón en México. Durante el escenario tendencial, el consumo energético de carbón es de 4.698 ktep, y por medio de la reducción de 939,6 ktep, se obtiene un consumo de 3758,4 ktep para el 2025 de carbón.

Es importante considerar que, para ambas medidas aplicadas, es necesario la implementación de las energías renovables con el fin de hacer frente a la demanda energética proveniente de los coches eléctricos y del retiro progresivo de las plantas carboeléctricas.

En este sentido, se realiza la instalación de 2.435 MW de energía eólica, 1.570 MW de energía fotovoltaica y 534 MW de energía hidroeléctrica. En términos de consumo energético, las energías limpias presentan un escenario de 10.147 ktep en el 2025, debido al aumento de 1302,30 ktep, se obtiene un valor de 11.450 ktep como contribución de las energías renovables durante este año.

A continuación, se presenta la hoja de cálculo para el año 2027.

SECTOR		CONTRIBUCIÓN (ktep): AÑO 2027						Total	%
		Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear		
Industria	ktep	13.163	2.491	5.180	10.963	1.398	0	33.195	33
	%	40	8	16	33	4	0		
Transporte	ktep	595	0	40.983	45	0	0	41.623	42
	%	1	0	98	0	0	0		
Servicio	ktep	2.550	0	1.601	228	159	0	4.538	5
	%	56	0	35	5	4	0		
Doméstico	ktep	5.270	0	5.327	574	5.576	0	16.746	17
	%	31	0	32	3	33	0		
Agric.y Pesca	ktep	1.174	0	2.126	0	0	0	3.300	3
	%	36	0	64	0	0	0		
Gen. Electricidad	ktep		1.439	11.448	32.114	15.683	2.119	62.802	
	%		2	18	51	25	3		
Total fuente	ktep	22.752	3.930	66.665	43.923	22.816	2.119		
Saldo eléctrico	ktep	345							
Electricidad generada	ktep	22.407							
Total E. Primaria	ktep							139.797	
%									
Total E Final	ktep							99.402	

Figura 85: Contribución por sectores en el 2027. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

La Figura 85 muestra la contribución de cada sector respecto al consumo energético para el año 2027. Los valores en los que se aplican las medidas de sostenibilidad se encuentran en color rojo. Durante este periodo se comienza la implementación del aumento de las energías renovables para generar energía eléctrica, la sustitución de los coches de combustible fósil por los coches eléctricos y retiro progresivo de centrales carboeléctricas.

Para realizar la transición hacia la electromovilidad, es necesario realizar una disminución del consumo de petróleo y al mismo tiempo un aumento para el consumo de electricidad para el sector transporte. El escenario tendencial muestra un consumo energético de 41.287 ktep de petróleo por parte del sector de transporte, se tiene una disminución de 304,80 ktep debido a la estimación de 331.311 coches eléctricos. Simultáneamente, se aumenta el consumo de energía eléctrica de 304,80 ktep para el sector de transporte debido a que los coches son eléctricos, es decir, su consumo energético es por medio de la electricidad.

Asimismo, la aplicación de la medida del retiro progresivo de centrales carboeléctricas sigue en proceso por medio de la reducción de ahora el 70% de producción eléctrica por carbón en México. Durante el escenario tendencial, el consumo energético de carbón es de 4.796 ktep, y por medio de la reducción de 3357,5 ktep, se obtiene un consumo de 1438,9 ktep para el 2027 de carbón.

Es importante considerar que, para ambas medidas aplicadas, es necesario la implementación de las energías renovables con el fin de hacer frente a la demanda energética proveniente de los coches eléctricos y del retiro progresivo de las plantas carboeléctricas.

En este sentido, se realiza la instalación de parques con una potencia instalada de 8.535 MW de energía eólica, 5.309 MW de energía fotovoltaica y 1340,2 MW de energía hidroeléctrica. En términos de consumo energético, las energías limpias presentan un escenario de 11.853 ktep en el 2027, debido al aumento de 3.830 ktep, se obtiene un valor de 15.683 ktep como contribución de las energías renovables durante este año.

A continuación, se presenta la hoja de cálculo para el año 2030.

SECTOR	CONTRIBUCIÓN (ktep): AÑO 2030						Total	%
	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear		
Industria	ktep 13.602	2.574	5.353	11.329	1.444	0	34.303	33
	% 40	8	16	33	4	0		
Transporte	ktep 2.166	0	41.967	47	0	0	44.170	43
	% 5	0	95	0	0	0		
Servicio	ktep 2.674	0	1.679	239	167	0	4.759	5
	% 56	0	35	5	4	0		
Doméstico	ktep 5.333	0	5.391	580	5.643	0	16.948	16
	% 31	0	32	3	33	0		
Agríc. y Pesca	ktep 1.235	0	2.236	0	0	0	3.471	3
	% 36	0	64	0	0	0		
Gen. Electricidad	ktep 0	0	12.597	34.823	19.565	2.119	69.104	
	% 0	0	18	50	28	3		
Total fuente	ktep 25.000	2.574	69.223	47.019	26.820	2.119		
Saldo eléctrico	ktep 345							
Electricidad generada	ktep 24.656							
Total E. Primaria							148.100	
Total E Final							103.652	

Figura 86: Contribución por sectores en el 2030. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

La Figura 86 muestra la contribución de cada sector respecto al consumo energético para el año 2030. Los valores en los que se aplican las medidas de sostenibilidad se encuentran en color rojo. Durante este periodo se comienza la implementación del aumento de las energías renovables para generar energía eléctrica, la sustitución de los coches de combustible fósil por los coches eléctricos y retiro progresivo de centrales carboeléctricas.

Para realizar la transición hacia la electromovilidad, es necesario realizar una disminución del consumo de petróleo y al mismo tiempo un aumento para el consumo de electricidad para el sector transporte. El escenario tendencial muestra un consumo energético de 43.491 ktep de petróleo por parte del sector de transporte, se tiene una disminución de 1524,03 ktep debido a la estimación de 1.656.558 coches eléctricos. Simultáneamente, se aumenta el consumo de energía eléctrica de 1524,03 ktep para el sector de transporte respecto a la electricidad debido a que los coches son eléctricos, es decir, su consumo energético es por medio de la electricidad.

Asimismo, la aplicación de la medida del retiro progresivo de centrales carboeléctricas llega a su fin por medio de la última reducción, lo que significa que la producción eléctrica por carbón en México se ha detenido por completo. Durante el escenario tendencial, el consumo energético de carbón es de 4.948 ktep, y por medio de las reducciones anteriores y sumando esta última de 651,2 ktep, se obtiene un consumo de 0 ktep para el 2027 de carbón, eliminando por completo su consumo y las emisiones de carbono provenientes de este recurso.

Es importante considerar que, para ambas medidas aplicadas, es necesario la implementación de las energías renovables con el fin de hacer frente a la demanda energética proveniente de los coches eléctricos y del retiro total de las plantas carboeléctricas.

En este sentido, se realiza la instalación de parques con una potencia instalada de 3.530 MW de energía eólica, 4.623 MW de energía fotovoltaica y 1320 MW de energía hidroeléctrica. En términos de consumo energético, las energías limpias presentan un escenario tendencial de 17.256 ktep en el 2030, y con el aumento de 2.308 ktep, se obtiene un valor de 19.565 ktep como contribución de las energías renovables durante este año.

A continuación, se presenta la hoja de cálculo para el año 2032.

SECTOR	CONTRIBUCIÓN (ktep): AÑO 2032						Total	%
	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear		
Industria	ktep 13.903	2.631	5.472	11.579	1.476	0	35.062	33
	% 40	8	16	33	4	0		
Transporte	ktep 4.105	0	41.800	49	0	0	45.955	43
	% 9	0	91	0	0	0		
Servicio	ktep 2.761	0	1.733	247	172	0	4.913	5
	% 56	0	35	5	4	0		
Doméstico	ktep 5.376	0	5.434	585	5.689	0	17.084	16
	% 31	0	32	3	33	0		
Agríc.y Pesca	ktep 1.277	0	2.313	0	0	0	3.590	3
	% 36	0	64	0	0	0		
Gen. Electricidad	ktep	0	13.834	31.972	26.137	3.949	75.892	
	%	0	18	42	34	5		
Total fuente	ktep 27.422	2.631	70.586	44.433	33.474	3.949		
Saldo eléctrico	ktep 345							
Electricidad generada	ktep 27.078							
Total E. Primaria							155.418	
Total E Final							106.604	

Figura 87: Contribución por sectores en el 2032. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

La Figura 87 muestra la contribución de cada sector respecto al consumo energético para el año 2032. Los valores en los que se aplican las medidas de sostenibilidad se encuentran en color rojo. Durante este periodo se comienza la implementación del aumento de las energías renovables para generar energía eléctrica, la sustitución de los coches de combustible fósil por los coches eléctricos y generación de electricidad a partir de la energía nuclear.

Para realizar la transición hacia la electromovilidad, es necesario realizar una disminución del consumo de petróleo y al mismo tiempo un aumento para el consumo de electricidad para el sector transporte. El escenario tendencial muestra un consumo energético de 43.663 ktep de petróleo por parte del sector de transporte, se tiene una disminución de 1862,7 ktep debido a la estimación de 2.024.682 coches eléctricos. Simultáneamente, se aumenta el consumo de energía eléctrica de 1862,7 ktep para el sector de transporte respecto a la electricidad debido a que los coches son eléctricos, es decir, su consumo energético es por medio de la electricidad.

Es importante considerar que, para la medida aplicada, es necesario la implementación de las energías renovables con el fin de hacer frente a la demanda energética proveniente de los coches eléctricos.

En este sentido, se realiza la instalación de parques con una potencia instalada de 7.800 MW de energía eólica, 4.216 MW de energía fotovoltaica y 2.750 MW de energía hidroeléctrica. En términos de consumo energético, las energías limpias presentan un escenario tendencial de 21.487 ktep en el 2032, y con el aumento de 4.649,65 ktep, se obtiene un valor de 26.137 ktep como contribución de las energías renovables durante este año.

Asimismo, se comienza a generar electricidad a partir del recurso nuclear con el funcionamiento de dos reactores ABWR de 1.350 MW cada uno en Laguna verde. Por lo que se aumenta en la matriz energética mexicana la energía nuclear con un total de 2.700 MW. Presenta un escenario tendencial de 2.119 ktep durante los años anteriores, sin embargo, en este periodo muestra una un aumento de 1830,23 ktep, lo que representa un total de 3.949 ktep de contribución energética. La energía nuclear es gran aporte al sistema eléctrico mexicano debido a que significa tener seguridad energética sin emisiones de carbono.

A continuación, se presenta la hoja de cálculo para el año 2035.

		CONTRIBUCIÓN (ktep): AÑO 2035							
SECTOR		Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear	Total	%
Industria	ktep	14.367	2.719	5.654	11.966	1.526	0	36.231	33
	%	40	8	16	33	4	0		
Transporte	ktep	7.405	0	41.310	52	0	0	48.768	44
	%	15	0	85	0	0	0		
Servicio	ktep	2.895	0	1.817	259	181	0	5.153	5
	%	56	0	35	5	4	0		
Doméstico	ktep	5.441	0	5.500	592	5.757	0	17.290	16
	%	31	0	32	3	33	0		
Agric.y Pesca	ktep	1.344	0	2.433	0	0	0	3.777	3
	%	36	0	64	0	0	0		
Gen. Electricidad	ktep	0	0	15.893	31.090	35.337	4.864	87.184	
	%	0	0	18	36	41	6		
Total fuente	ktep	31.451	2.719	72.607	43.960	42.801	4.864		
Saldo eléctrico	ktep	345							
Electricidad generada	ktep	31.106							
Total E. Primaria	ktep							167.295	
%									
Total E Final	ktep							111.218	

Figura 88: Contribución por sectores en el 2035. Fuente: Elaboración propia con plantilla de (E., 2023)

La Figura 88 muestra la contribución de cada sector respecto al consumo energético para el año 2035. Los valores en los que se aplican las medidas de sostenibilidad se encuentran en color rojo. Durante este periodo se comienza la implementación del aumento de las energías renovables para generar energía eléctrica, la sustitución de los coches de combustible fósil por los coches eléctricos y generación de electricidad a partir de la energía nuclear.

Para realizar la transición hacia la electromovilidad, es necesario realizar una disminución del consumo de petróleo y al mismo tiempo un aumento para el consumo de electricidad para el sector transporte. El escenario tendencial muestra un consumo energético de 44.358 ktep de petróleo por parte del sector de transporte, se tiene una disminución de 3048,06 ktep debido a la estimación de 3.313.117 coches eléctricos. Simultáneamente, se aumenta el consumo de energía eléctrica por 3048,06 ktep para el sector de transporte respecto a la electricidad debido a que los coches son eléctricos, es decir, su consumo energético es por medio de la electricidad.

Es importante considerar que, para la medida aplicada, es necesario la implementación de las energías renovables con el fin de hacer frente a la demanda energética proveniente de los coches eléctricos.

En este sentido, se realiza la instalación de parques con una potencia instalada de 6.100 MW de energía eólica, 10.680 MW de energía fotovoltaica y 2.750 MW de energía hidroeléctrica. En términos de consumo energético, las energías limpias presentan un escenario tendencial de 30.026 ktep en el 2035, y con el aumento de 5.311,5 ktep, se obtiene un valor de 35.337 ktep como contribución de las energías renovables durante este año.

Asimismo, se comienza a generar electricidad a partir del recurso nuclear con el funcionamiento de un reactor ABWR de 1.350 MW en Monterrey. Por lo que se aumenta en la matriz energética mexicana la energía nuclear con un total de 1.350 MW. Presenta un escenario tendencial de 3.949 ktep durante los años anteriores, sin embargo, en este periodo muestra un aumento de 915 ktep, lo que representa un total de 4.864 ktep de contribución energética.

La energía nuclear es gran aporte al sistema eléctrico mexicano debido a que significa tener seguridad energética sin emisiones de carbono.

9.2 PRESUPUESTO

En este último apartado, se lleva a cabo una estimación económica o presupuesto referente al desarrollo del trabajo académico. Se incluyen las actividades principales y secundarias, así como también los recursos materiales utilizados durante la elaboración del análisis de la matriz energética de México.

9.2.1 ACTIVIDADES PRINCIPALES

- Análisis de la situación energética de México: Esta actividad se enfoca en el análisis y evaluación de los recursos energéticos del país con el fin de realizar propuestas adecuadas de acuerdo con su proyección real. La duración de esta fase es de un total de 50 horas durante dos semanas.
- Obtención de los datos y cálculos: Esta fase incluye la obtención de consumos energéticos de México y su aplicación en la hoja de cálculo. Esta actividad se realiza durante dos semanas con un total de 55 horas.
- Implementación de las propuestas en la hoja de cálculo: Esta actividad desarrolla la aplicación de medidas de sostenibilidad en la hoja de cálculo. Para esta fase se requiere un mes y medio con un total de 192 horas de labor.
- Redacción del trabajo académico: La última actividad consiste en la redacción del informe del análisis de la matriz energética mexicana en conjunto con sus propuestas de sostenibilidad y visualización de resultados. Esta actividad se lleva a cabo durante tres meses con un total de 495 horas.

9.2.2 ACTIVIDADES SECUNDARIAS

De manera adicional, se consideran actividades complementarias como parte del proceso de realización del trabajo académico, las cuales son:

- Revisión y guía por parte del tutor académico: Para las actividades de revisión del tutor se tiene un total de 40 horas en las que se incluyen consultas, evaluación de progreso y revisiones.

9.2.3 EQUIPOS Y OTROS SERVICIOS

Para llevar a cabo el trabajo académico, se consideran equipos, los cuales se incluye:

- Equipo de cómputo: Se utiliza un portátil para el desarrollo de evaluación, cálculos y redacción del informe. Se considera una utilización de aproximadamente cinco meses.

Respecto a los programas utilizados son:

- Microsoft office Excel: Es un programa de hojas de cálculo que permite un análisis avanzado y una mejora de visualización de datos. Se utiliza la licencia incluida por ser alumno de la Universidad Politécnica de Valencia.
- PVGIS: Es un programa de libre aplicación que proporciona información incluyendo la radiación solar y el rendimiento para los sistemas fotovoltaicos.

Los servicios utilizados se detallan a continuación:

- Consumo eléctrico y servicio de internet: Se considera la utilización del servicio eléctrico de y de internet por un periodo de 6 meses.

9.2.4 COSTOS DEL TRABAJO ACADÉMICO

A continuación, se explica detalladamente los costos obtenidos para cada actividad en la siguiente tabla.

Tabla 33: Costos asociados a las actividades principales, secundarias y servicios. Fuente: Elaboración propia

Propiedad	Cantidad	Unidad	Costo por unidad (€)	Total (€)
Actividades principales				12.180,96
Análisis de la situación energética de México	50	Horas	15,38	769
Obtención de los datos y cálculos	55	Horas	15,38	845,90
Implementación de las propuestas en la hoja de cálculo	192	Horas	15,38	2952,96
Redacción del trabajo académico	495	Horas	15,38	7613,10
Actividades secundarias				3.200,00
Revisión y guía por parte del tutor académico	40	Horas	80,00	3.200,00
Servicios				240,00
Consumo eléctrico	6	Meses	30,00	180,00
Internet	6	Meses	10,00	60,00

Asimismo, se lleva a cabo la Tabla 34 en donde se presentan los costos relacionados a la utilización del equipo y programas. Se considera un tiempo de vida de 5 años para el portátil.

Tabla 34: Costos asociados al equipo y programas. Fuente: Elaboración propia

Propiedad	Cantidad	Unidad	Costo por unidad (€)	Total (€)
Equipo de computo	1	Equipo portátil	800,00	80,00
Programas				0,00
Microsoft Office Excel	1	Licencia de Software	0,00	0,00
PVGIS	1	Aplicación de libre uso	0,00	0,00

Para obtener el monto de la utilización del equipo de cómputo se consideran los 5 años de tiempo de vida del portátil y el costo total del dispositivo es de 800 €. Entonces, cada año equivale a 160 € de su uso total. En este sentido, se utiliza por medio año, equivalente a 80€.

9.2.5 PRESUPUESTO TOTAL DEL TRABAJO ACADEMICO

Para finalizar, se realiza una tabla que incluye los costos totales del proyecto con los impuestos aplicables a su desarrollo.

Tabla 35: Resumen del presupuesto total del proyecto. Fuente: Elaboración propia

Propiedad	Total (€)
Actividades principales	12.180,96
Actividades secundarias	3.200
Servicios	240,00
Equipo de computo	80,00
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	15.700,96
COSTO TOTAL DEL PROYECTO (IVA 21%)	18.998,16

A partir de la última tabla, se puede entender que el costo total del proyecto es de 18.998,16 € con IVA incluido.