



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS:

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUÍMICA

PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS SUSTENTABLES

PRESENTA

I.Q. EDGAR GEOVANNI MORA JACOBO

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

MORELIA, MICHOACÁN, FEBRERO, 2021.

PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS SUSTENTABLES

Por: I.Q. Edgar Giovanni Mora Jacobo

RESUMEN

En los últimos años, el uso de combustibles fósiles se ha incrementado gradualmente, en consecuencia, las emisiones de gases de efecto invernadero en el planeta tuvieron una tendencia similar, el principal motivo es el consumo de dichos combustibles. En la actualidad, la producción de energía eléctrica ha tomado un rol importante en el mundo, la mayor parte de la energía eléctrica producida es a través de combustibles fósiles. El consumo en varias áreas productivas como transporte, comunicación, alimentos, industria, residencial, entre otras, ocasiona que la importancia de esta forma de energía sea cada vez mayor, causando que su producción, distribución y suministro confiable este en un ciclo de mejora continua. Con el fin de disminuir este consumo, se ha propuesto el uso de otras fuentes de energía como las renovables, las cuales tienen un impacto ambiental menor que los combustibles fósiles. El reto de utilizar fuentes de energía renovables implica que su producción y el diseño de sus cadenas de suministro busquen beneficios económicos, ambientales y sociales, los cuales han sido expuestos como beneficios globales, esto representa un riesgo en el grado de satisfacción de los participantes en la cadena de suministro. El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un modelo de optimización para los sistemas energéticos sustentables, que permita el análisis, planificación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y proyección de escenarios de acuerdo con los objetivos deseados.

Palabras Clave: Modelo; Multi-stakeholder; Planificación; Optimización; Sistema Eléctrico Nacional.

Dirigido por: Dr. José María Ponce Ortega.

PLANNING OF SUSTAINABLE ENERGY SYSTEMS

By: Ch.E. Edgar Geovanni Mora Jacobo

ABSTRACT

Climate change coupled with global warming, has generated important challenges in the world, in recent years greenhouse gas emissions have increased exponentially, the main reason is due to the use of fossil fuels for power generation. One of the challenges is to reduce the consumption of these fuels, in order to achieve this objective a sustainable energy transition has been proposed that consists of using other types of energy sources such as renewable, these energy sources have a lower environmental impact than fossil fuels. The objectives of the research project are to develop an optimization model for sustainable energy systems, which allows the analysis and planning of the National Electric System taking into account the projection of scenarios.

Keywords: Optimization; Analysis; Planning; Multi-stakeholder; Energy sources; Energy transition.

Directed by: Ph.D. José María Ponce Ortega.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
NOMENCLATURA	8
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. GENERALIDADES	15
1.2. ANTECEDENTES	17
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES	22
1.4 JUSTIFICACIÓN	22
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
1.6 HIPÓTESIS.....	24
CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO.....	25
2.1 ENERGÍA ELÉCTRICA	26
2.2 SISTEMA ELECTRICO NACIONAL.....	27
2.2.1 REGIONES DE CONTROL.....	27
2.3 INTERCONEXIONES TRANSFRONTERIZAS.....	29
2.3.1 INTERCONEXIONES CON NORTEAMÉRICA	29
2.3.2 INTERCONEXIONES CON CENTROAMÉRICA	30
2.4 REGIONES DE TRANSMISIÓN	30
2.4.1 CAPACIDAD DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN	31
2.5 CONSUMO BRUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR REGIÓN DE CONTROL	32
2.5.1 CONSUMO BRUTO MENSUAL DEL SEN.....	33
2.6 CENTRALES ELÉCTRICAS	34
2.7 MONETIZACIÓN DE CO ₂	39
2.8 ENERGÍAS RENOVABLES	40
2.8.1 ENERGÍA EÓLICA	40
2.8.2 ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	41
2.8.3 ENERGÍA FOTOVOLTAICA	42
POTENCIAL DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	43
2.8.4 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA.....	43
2.8.5 ENERGÍA DE BIOMASA	43
2.9 OPTIMIZACIÓN.....	44
CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA.....	46
3.1 SUPERESTRUCTURA.....	47
3.2 MODELO MATEMÁTICO	48

3.2.1 Balance de generación de energía por región de control.	51
3.2.2 Pérdidas de energía por producción	51
3.2.3 Límite para la energía exportada.....	52
3.2.4 Balance para demanda de energía por región de control	52
3.2.5 Límites para la energía transmitida entra las regiones de control e importación por agentes externos	53
3.2.6 Pérdidas de energía por transmisión	53
3.2.7 Generación de energía de las instalaciones generadoras	54
3.2.8 Límites para la energía generada por instalaciones de generación	54
3.2.9 Capacidad de las instalaciones	54
3.2.10 Costo operativo para diferentes instalaciones de generación existentes	54
3.2.11 Costo operativo para diferentes instalaciones de generación nuevas	55
3.2.12 Costo de capital para instalaciones de generación nuevas	55
3.2.13 Costos por importación y transmisión de energía	55
3.2.14 Costo total anual.....	56
3.2.15 Emisiones.....	56
3.2.16 Agua utilizada	57
3.2.17 Tierra utilizada	57
3.4 ENFOQUE MULTISTAKEHOLDER	57
CAPÍTULO 4 : RESULTADOS.....	59
4.1 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO	60
4.1.1 UNIDADES O INSTALACIONES DE ENERGÍA	63
4.1.2 TRANSFERENCIA DE ENERGÍA ENTRE REGIONES DE CONTROL E IMPORTACIÓN.	66
4.2 ENFOQUE MULTI-STAKEHOLDER	68
BIBLIOGRAFÍA	74
APÉNDICE A. PUBLICACIONES	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolución del consumo mundial de energía en terawatts-hora (TWh).	15
Figura 1.2 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en México.	18
Figura 2.1 Regiones de control del SEN. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	28
Figura 2.2 Interconexiones de energía transfronterizas. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	30
Figura 2.3 Líneas de transmisión del SEN. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	31
Figura 2.4 Consumo bruto de energía eléctrica por región de control. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	32
Figura 2.5 Consumo bruto mensual del SEN en 2017. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	33
Figura 2.6 Potencial de energía eólica. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	41
Figura 2.7 Potencial de energía geotérmica. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	42
Figura 2.8 Potencial de energía fotovoltaica. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	43
Figura 2.9 Potencial de energía de biomasa. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).	44
Figura 3.1 Superestructura.	47
Figura 3.2 Representación de una región de control.	48
Figura 4.1 Representación gráfica de los resultados del modelo matemático con objetivos individuales.	61
Figura 4.2 Porcentaje de participación por tecnología para el escenario 1.	63
Figura 4.3 Porcentaje de participación por tecnología para el escenario 2.	65
Figura 4.4 Porcentaje de participación por tecnología para el escenario 3.	66
Figura 4.5 Interacción y representación entre dos regiones de control.	68
Figura 4.6 Representación gráfica de los resultados del modelo matemático multiobjetivo	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Consumo bruto de energía eléctrica por región de control.....	33
Tabla 2.2 Centrales de energía existentes en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018). ...	34
Tabla 3.1 Principales Parámetros Utilizados Para el Estudio de Caso Abordado.	49
Tabla 4.1 Resultados del modelo matemático con objetivos individuales.....	60
Tabla 4.2 Transferencia de energía entre regiones de control para el escenario 1.	66
Tabla 4.3 Transferencia de energía entre regiones de control para el escenario 2.	67
Tabla 4.4 Transferencia de energía entre regiones de control para el escenario 3.	67
Tabla 4.5 Resultados del modelo matemático multiobjetivo.	70

NOMENCLATURA

CONJUNTOS

i	Región de control (1.-Central, 2.-Oriental, 3.-Occidental, 4.-Noroeste, 5.-Norte, 6.-Noreste, 7.-Peninsular, 8.-Baja California, 9.-Baja California Sur, 10.-Mulegé).
$i1$	Alias de i
j	Instalaciones de generación totales (201 instalaciones de energía).
$j1(j)$	Instalaciones de generación existentes (178 instalaciones de energía).
$j2(j)$	Instalaciones de generación nuevas (23 instalaciones de energía).
t	Periodo de tiempo (Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre, Diciembre).

PARÁMETROS

$\alpha_{i,j,t}^f$	Factor de conversión o eficiencia para combustible utilizado por instalaciones generadoras de energía de acuerdo con su tipo de tecnología, GWh/hm ³ , GWh/hm ² , GWh/ton.
$\beta_{i,j}^{emco2}$	Factor de recuperación de emisiones CO ₂ de la combustión de recursos, ton/GWh.
$\gamma_{i,j}^{water}$	Factor de recuperación del agua utilizada por las centrales eléctricas, hm ³ /GWh.
$\delta_{i,j}^{land}$	Factor de recuperación de tierras utilizadas por instalaciones de generación, hm ² /GWh.
$\varepsilon_{i,j}^{emnox}$	Factor de recuperación de emisiones NO _x de la combustión de recursos, ton/GWh.

$\eta_{i,t}^{fso2}$	Factor de recuperación de emisiones SO ₂ de la combustión de recursos, ton/GWh.
$\phi_{i,j}^{lp}$	Coeficiente de pérdidas por producción de energía en instalaciones generadoras de acuerdo con su tipo de tecnología.
$\tau_{i,i1}^{let}$	Coeficiente de pérdida por transmisión de energía.
$CapCost_{i,j1}^e$	Costo de capital para las instalaciones existentes, MMUSD.
$CINV_{i,j2}$	Costo de inversión para nuevas instalaciones, MMUSD/GWh.
$DE_{i,t}$	Demanda de energía en la región i, en el período de tiempo t, GWh.
$ee_{i,t}^{cap}$	Capacidad de las líneas de exportación de energía, GWh.
$GE_{i,n}^{capn}$	Máxima capacidad de generación de energía para instalaciones nuevas, GWh.
$GE_{i,j,t}^{max}$	Máxima energía generada en instalaciones generadoras de energía de acuerdo con su tipo de tecnología, GWh.
$GE_{i,j,t}^{min}$	Mínima energía generada en instalaciones generadoras de energía de acuerdo con su tipo de tecnología, GWh.
$gescap_{i,i1,t}$	Capacidad de las líneas de transmisión para la energía enviada de la región i a i1 en un tiempo t, GWh.
IC_i	Costo medio anual por región de control de importación de energía, MMUSD/GWh.
$ie_{i,t}^{cap}$	Capacidad de las líneas de exportación de energía, GWh.
k_F	Factor utilizado para anualizar los costos de capital.
$POW_{i,j1}^e$	Potencia de las instalaciones de energía existentes, GW.

TC	Costo medio anual de transporte de energía, MMUSD/GWh.
UFC_{ij1}	Costo fijo unitario para instalaciones de energía, MMUSD/GWh.
UVC_{ij1}	Costo unitario variable para instalaciones de energía, MMUSD/GWh.
Z_i^{exp}	Parámetro binario para la energía exportada.
Z_i^{imp}	Parámetro binario para la energía importada.
$Z_{s_{i,i1}}$	Parámetro binario para interconexión de regiones donde existe envío de energía.

VARIABLES

$CapCost_{i,j2}^n$	Costo de capital para instalaciones existentes, MMUSD.
$ee_{i,t}$	Energía exportada de la región i en un tiempo t, a un agente externo, GWh.
$EmPlant_{i,j}$	Emissiones de la planta j en la región i, ton.
$f_{i,j,t}^f$	Recurso disponible utilizado en instalaciones generadoras de energía de acuerdo con su tipo de tecnología, ton, hm ³ , hm ² .
$gec_{i,t}$	Electricidad consumida en la zona i, en el período t, GWh.
$ges_{i,t}$	Energía enviada de la región i a i1 en un tiempo t, GWh.
$GEi_{i,t}^P$	Energía generada en la región i, en el periodo de tiempo t, GWh.
$GEj_{i,j,t}^P$	Energía generada en la región i, en las instalaciones nuevas y existentes j, en el periodo de tiempo t, GWh.

$ICost_i$	Costos por la energía importada hacia una región i, MMUSD.
$ie_{i,t}$	Energía importada hacia la región i en un tiempo t, desde un agente externo, GWh.
$LandPlant_{i,j}$	Terreno utilizado por instalaciones de generación de energía, hm ² .
$loste_{i,j,t}^p$	Pérdida de energía por producción en cada región i, en las instalaciones generadoras de energía de acuerdo con su tipo de tecnología, en el periodo de tiempo t, GWh.
$loste_{i,t}^{trans}$	Pérdida de energía por transmisión en cada región i, en el periodo de tiempo t, GWh.
$OptCost_{i,j}$	Costo operativo para las diferentes instalaciones de generación de energía, MMUSD.
$POW_{i,j}^n$	Potencia de las instalaciones de energía nuevas, GW.
$TCost_{i,i1}$	Costos por la energía transportada de una región i a i1, MMUSD.
TAC	Costo anual total, MMUSD.
TE_m	Emissiones anuales totales, ton.
TLa	Terreno total utilizado, hm ² .
$TWater$	Consumo anual total de agua, hm ³ .
$WaterPlant_{i,j}$	Consumo de agua de instalaciones de generación de energía, hm ³ .

VARIABLES BINARIAS

$y_{i,j}$ Variable binaria que indica que una instalación (j) debe usarse o no.

- $y_{i,j1}$ Variable binaria que indica que una instalación existente (j1) debe usarse o no en el futuro.
- $y_{i,j2}$ Variable binaria que indica que una nueva instalación (j2) debe usarse o no en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

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

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

A Conacyt por su apoyo y su aportación financiera.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.

1.1 GENERALIDADES

1.2 ANTECEDENTES

1.3 OBJETIVOS

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.6 HIPÓTESIS

1.1. GENERALIDADES

El incremento en la población mundial, el estilo de vida, la globalización, el avance en la tecnología, entre otros motivos, han causado que el consumo de energía en el planeta crezca exponencialmente de la misma manera que las emisiones de gases de efecto invernadero. Hasta la actualidad, los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía y su uso el factor fundamental que han generado estos problemas globales [1]. El dióxido de carbono es el principal gas emitido ya que representa aproximadamente el 77% de las emisiones de los gases de efecto invernadero. Con el fin de disminuir los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera, se ha puesto énfasis en encontrar métodos para almacenar o utilizar el CO₂ que se origina de los procesos industriales. De igual manera, las fuentes de energía renovable representan un gran enfoque para disminuir los impactos ambientales, se les considera fuentes de energía limpias y se pueden regenerar de manera natural o artificial [2]. Las fuentes de energía renovable cuentan con un gran potencial de desarrollo para cubrir las necesidades de energía en la actualidad [3]. El desarrollo de dichas fuentes representa beneficios socio-económicos de una región ya que contribuye con la generación de empleo, incrementa su desarrollo económico y provoca una disminución de las importaciones de energía [4].

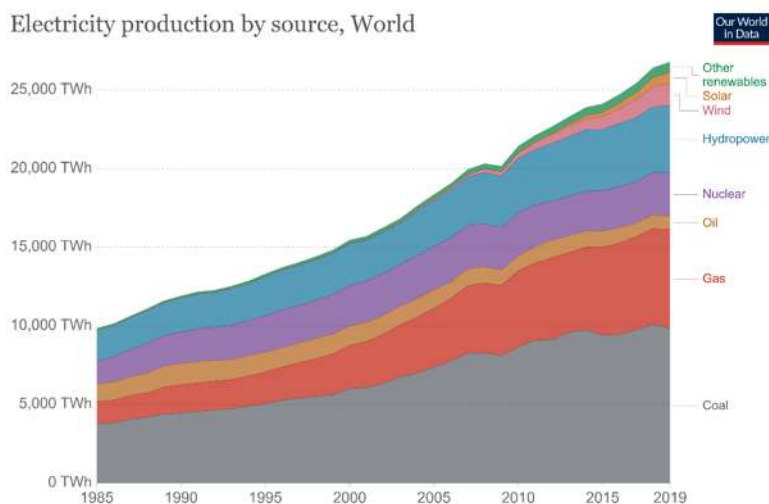


Figura 1.1 Evolución del consumo mundial de energía en terawatts-hora (TWh).

Fuente: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember (2020). Note: 'Other renewables' includes biomass and waste, geothermal, wave and tidal.

En México, las energías renovables tienen un alto potencial de desarrollo, en el 2017 se generó alrededor del 16% de la energía total del país a partir de estas, donde la energía hidroeléctrica representa el 10%, la eólica el 3%, la geotérmica el 2%, la biomasa el 0.5%, la solar el 0.4% y el biogás el 0.1%. El país se ha planteado el objetivo de cubrir la tercera parte de su consumo energético para el 2024, a través de fuentes de energía renovables [5].

Enriquez y El-Halwagi [6] desarrollaron una simulación donde evaluaron el método de mineralización, el cual es un proceso para convertir el CO₂ en productos de valor agregado, esto a partir de residuos industriales alcalinos como las cenizas volantes producidas de la combustión sólidos, residuos de la fabricación cemento o escoria de fabricación de acero con altos contenidos de calcio, con el fin de mejorar su rentabilidad.

De acuerdo con Stuart et al. [7], una biorefinería es aquella que a partir del tratamiento y conversión de biomasa genera biocombustibles, energía y productos químicos. La decisión de la ubicación de una biorefinería representa un aspecto muy importante debido a la distribución natural de la materia prima y a los costos que se generan por su transporte. Zhang et al. [8] presentaron una metodología para determinar una ubicación óptima para el procesamiento de biomasa y obtención de productos de valor agregado. Para motivar el uso de la biomasa se deben considerar algunos aspectos como la tecnología para la conversión de la misma y la cadena de suministro. En este aspecto se han realizado varias aportaciones para simular y optimizar una cadena de suministro de biomasa donde el objetivo ha sido reducir los costos mediante un sistema de transporte de la materia prima eficiente [9].

Santibañez-Aguilar et al. [10] desarrollaron un modelo de optimización multiobjetivo para una planificación óptima de una biorefinería, donde se considera la maximización de las ganancias y la minimización del impacto ambiental. Algunas contribuciones plantean funciones objetivo en torno a la disponibilidad de los recursos, la demanda de productos, las rutas de procesamiento, así como los costos de materias primas [11]. Otras aportaciones desarrollaron objetivos globales para las cadenas de suministro [12]. Awudu y Zhang [13], así como Ren et al. [14], y Kim et al. [15] presentaron enfoques para modelar

las incertidumbres existentes en las cadenas de suministro. El-Halwagi et al. [16] establecieron un enfoque con la incorporación de criterios de ubicación, tamaño y seguridad. López-Díaz et al. [17] además de Alemán-Nava et al. [18] desarrollaron un enfoque de optimización donde consideraron limitaciones para los almacenamientos hídricos utilizados en los procesos para las cadenas de suministro de biocombustible e implementaron el enfoque MFA (Material Flow Analysis) para un modelo matemático donde interactúan cuencas hidrográficas con sistemas involucrados en dichas cadenas, Andrés-Martínez et al. [19] modelaron el sistema eléctrico mexicano donde consideraron un concentrador que consta de 9 concentradores más pequeños referidos a las regiones de control del sistema eléctrico nacional, para satisfacer la demanda nacional, modelaron un sistema con 71 instalaciones de energía. Sin embargo, no se ha considerado la implementación de nuevas instalaciones de energía, el retiro de algunas instalaciones de energía, las pérdidas de energía por producción, las pérdidas de energía por transmisión de la misma, tomando como objetivos el costo total anual, las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo total de agua por las instalaciones de energía, de igual manera no se ha implementado un enfoque multiobjetivo para analizar el comportamiento del sistema eléctrico nacional. Por lo tanto, en este documento se abordará un enfoque de optimización para una planeación y distribución óptima del sistema eléctrico nacional con el objetivo de satisfacer la demanda de energía cumpliendo con todos los requerimientos y abordando la instalación de nuevas unidades de energía. De acuerdo con Maskin [20], en un equilibrio de Nash, los involucrados no pueden aumentar su bienestar óptimo por un cambio unilateral de estrategia, pero éste puede mejorar por un cambio simultáneo de estrategia de varios involucrados.

1.2. ANTECEDENTES

En aproximadamente 25 años, México ha incrementado en un 54% sus emisiones de gases de efecto invernadero, del total de las emisiones, 70% se debieron al consumo de combustibles fósiles [20]. El gas más relevante que emite nuestro país es el bióxido de carbono con 71% de las emisiones. En 2017, el índice de independencia energética fue equivalente a 0.76, este resultado implica que la cantidad de energía producida en el país fue 24% menor que el consumo del mismo. El esfuerzo colectivo de las naciones por

disminuir las emisiones y promover la sostenibilidad del sector energético provocó que la producción de energía renovables incrementara 3.6%.

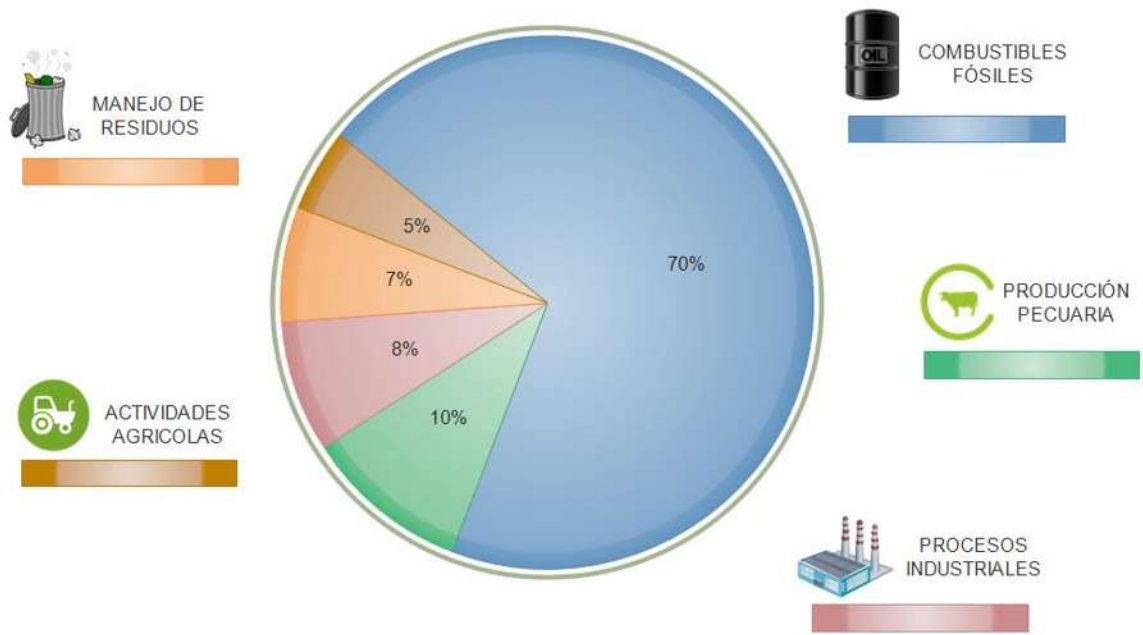


Figura 1.2 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en México.

Con el fin de disminuir el consumo de recursos fósiles, se ha propuesto el uso de otras fuentes de energía como las renovables, donde se engloban una serie de fuentes energéticas como la biomasa, las centrales hidroeléctricas, fotovoltaica, eólica, geotérmica, entre otras, las cuales tienen un impacto ambiental menor que los combustibles fósiles [21]. La energía que brinda el sol al planeta durante un año supera en aproximadamente 20 veces la energía que generan los combustibles fósiles y miles de veces superior al consumo de energía actual. Todas las fuentes de energía mencionadas se generan a partir de la energía que emite el sol ya sea en forma de calor o de luz, excepto la energía geotérmica que proviene de las altas temperaturas que se generan en el centro del planeta.

La generación de energía eólica en México es superior a los 10,000 GWh. En cuanto a energía solar, se estima que el 90% del territorio nacional presenta una insolación promedio de 5 kWh por metro cuadrado al día, considerado como uno de los mejores niveles presentados en el mundo. Por su parte, México es líder en producción de

electricidad de fuentes geotérmicas en el mundo, ocupando un tercer lugar con una capacidad instalada de 925 MW y generando 6,000 GWh.

México ha puesto en marcha el parque eólico más grande de América Latina, llamado Eurus. Este parque es también el segundo en reducción de emisiones según el registro de Naciones Unidas, evitando 600,000 toneladas de CO₂ por año, y la generación de energía equivale, al consumo de una población de 500,000 habitantes.

El potencial energético bruto de la biomasa en México se ubica alrededor de los 3,000 PJ por año, considerando madera de bosques, plantaciones forestales, subproductos agrícolas y cultivos energéticos [22].

México no contaba con un marco jurídico en torno a la bioenergía, hasta el año 2008 cuando se emitió la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos para incentivar la producción, transporte y comercialización de bioenergéticos [23]. De acuerdo con esto, el sector de la bioenergía resulta un sector con un gran potencial de explotación, ya que se deben desarrollar sistemas de producción de energía eficaces que involucren diferentes objetivos como costos bajos, menor impacto ambiental y beneficios sociales. Con lo antes mencionado, hay un reto muy importante de investigación, el cual es diseñar y optimizar las cadenas de suministro desde la producción de materia prima hasta su uso final en los mercados de consumo. Frecuentemente se involucran múltiples objetivos cuando se optimizan las cadenas de suministro, los cuales se contraponen de manera directa e indirecta, por lo que hay que considerar compensaciones entre los diferentes objetivos y proporcionar soluciones óptimas para la toma de decisiones [24].

La captura convencional de CO₂ como la recuperación de petróleo o el almacenamiento geológico ayuda a reducir los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero en el ambiente, pero no reducen la cantidad total de CO₂ en el planeta. La mineralización a partir de residuos industriales se considera como una herramienta para la utilización del CO₂ con beneficios tanto ambientales como económicos, la cual tiene un gran potencial para convertir el CO₂ en productos de valor agregado considerando un beneficio económico por la venta de los mismos, obteniendo así una captura más prolongada del CO₂ de manera molecular. [25] Ya antes mencionamos los tipos de

residuos considerados para el proceso de mineralización, el motivo por el cual se consideraron estos residuos como materia prima se debe a que las partículas de dichos residuos generalmente ya se encuentran en tamaños viables para reaccionar, la fácil disponibilidad en grandes cantidades y un alto contenido en calcio [26].

La producción anual de cenizas volantes en el planeta es aproximadamente de 500 millones de toneladas, hay dos clases de cenizas volantes las cuales se diferencian por el contenido de calcio, sílice y hierro, una de ellas es la Clase F que contiene del 1% al 12% de calcio y la otra es la Clase C que contiene de 30% a 40% de calcio [27].

Millones de toneladas de residuos que surgen como un subproducto del proceso de producción del cemento, o los que se obtienen por la pulverización de hormigón, tienen un gran potencial de explotación para la mineralización ya que contienen del 20% al 60% de óxido de calcio [28].

La escoria de acero es un subproducto de la fabricación del mismo. Normalmente a esta escoria se le considera como residuo y contiene alrededor de 25% a 55% de óxido de calcio, se considera que por cada tonelada de acero producido se generan 0.2 toneladas de escoria de acero [29].

En la estructura de una cadena de suministro de energía se ha tratado de mejorar varios aspectos como la ubicación de los centros de procesamiento, la red de logística, las áreas de cultivo, entre otros, es por eso que las herramientas de optimización son importantes en la estructura de dicha cadena. En general, las cadenas de suministro consisten en una red resumida de proveedores, fabricantes y consumidores [30].

Giarola y Bezzo [31] desarrollaron la planificación estratégica y diseño de las cadenas de suministro de biocombustible donde propusieron un marco de optimización de múltiples objetivos simultáneamente. Bernardi et al. [32] implementaron un modelo que permite optimizar el aspecto económico, minimizar los riesgos financieros, identificar ubicaciones óptimas de áreas de cultivo.

En una cadena de suministro pueden existir muchas incertidumbres. Algunas de ellas surgen debido a la naturaleza de la distribución de la materia prima, las condiciones o fenómenos climatológicos en la zona, recursos hídricos disponibles, fluctuación de precios, oferta y demanda tanto de materia prima como de productos terminados, y logística. Las cadenas de suministro de biocombustibles deben incorporar las incertidumbres para obtener aproximaciones óptimas [33].

Grossman y Guillén-Gosálbez [34] determinaron que existía una necesidad de implementar herramientas de optimización que auxiliaran a la toma de decisiones y desarrollaron técnicas que pueden evaluar diferentes procesos en situaciones de incertidumbre. Huang et al. [35] centraron su atención en el diseño de una cadena de suministro de biocombustibles que contemplara incertidumbres como estaciones meteorológicas y disponibilidad de materia prima. Shabani et al. [36] propusieron un modelo multi-objetivo para la planificación de la cadena de suministro donde involucra la incertidumbre en el suministro de biomasa con el objetivo de equilibrar el riesgo-beneficio y proporciona soluciones óptimas.

Las teorías económicas como los modelos de equilibrio y los métodos de simulación se han utilizado para estimar impactos en la industria de bioenergía. Recientemente se ha prestado atención en aplicaciones de ingeniería donde el objetivo es diseñar un proceso equilibrado desde una perspectiva de la teoría de juegos [37].

Cachon y Netessine [38] proporcionaron un análisis para las aplicaciones de las teorías de los juegos en cadenas de suministro con múltiples participantes, principalmente con objetivos que se contraponen. Bai et al. [39] desarrollaron una optimización basada en una teoría de juegos, como se le considera a la teoría líder-seguidor de Stackelberg, donde los seguidores maximizan sus ganancias individualmente conforme a la oferta del líder.

Andrés-Martínez et al. [19] desarrollaron un modelo de optimización implementado o enfocado al sistema eléctrico nacional, donde se tomaron en cuenta 9 regiones de control y 71 unidades de generación de energía.

A pesar de estas contribuciones, aún no se ha abordado la distribución óptima del beneficio social entre los participantes en una cadena de suministro, así como una planeación del sistema eléctrico nacional, donde tienen una potencial aplicación diferentes esquemas como el esquema Multi-stakeholder. Por lo que resulta importante diseñar sistemas que involucren dichos esquemas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de optimización para la distribución, diseño, planeación entre los participantes en una cadena de suministro de energía para el desarrollo de una región teniendo en cuenta la instalación de nuevas unidades.

1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Desarrollar un modelo de optimización para el sistema energético donde se involucre el esquema multi-stakeholder.
- Desarrollar la planificación y diseño del sistema eléctrico nacional, con el fin de satisfacer la demanda nacional.
- Desarrollar una superestructura que nos permita definir el sistema energético a estudiar.
- Analizar y elaborar un modelo de optimización del sistema energético abordando el beneficio social, trasladándolo a un lenguaje de programación en GAMS®.
- Desarrollar un modelo reproducible, para lograr un desarrollo sustentable del sistema energético en diversas regiones.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los combustibles fósiles son la principal fuente de energía en el mundo, y uno de los principales motivos del calentamiento global, cada vez es más frecuente las catástrofes por dicho motivo. La necesidad de tener un sistema eléctrico sustentable ha motivado el uso de fuentes de energía renovables, que debe fomentar la inversión en unidades con recursos renovables. Hasta ahora en el país existe un potencial desarrollo de las fuentes de energía renovables, donde el proceso de transformación representa uno de las más

importantes. Sin embargo, las cadenas de suministro analizadas, a pesar de lograr satisfacer la demanda de energía, así como el beneficio económico de la región, no han logrado una distribución óptima de los participantes en la cadena de suministro de energía, como minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, minimizar el consumo total de agua por la cadena de suministro de energía, tomando en cuenta los beneficios socio-económicos entre los participantes del proceso, asociado a esto el esquema multi-stakeholder con el objetivo de encontrar soluciones factibles observando las tendencias de los escenarios analizados y representan opciones considerables para la planificación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En ciertas regiones de México se ha observado un bajo crecimiento económico y en otras incluso un decrecimiento [40]. La zona centro-oeste es una de ellas, dicha zona cuenta con recursos hídricos disponibles, condiciones climatológicas favorables para el desarrollo de fuentes de energía e importantes áreas de cultivo de biomasa [41]. Debido a la potencial explotación de los recursos renovables en la zona y el bajo crecimiento económico de la región, se considera una zona sustancial para implementar una cadena de suministro con el fin de satisfacer parte de las fuertes demandas de energía en la actualidad, además de disminuir el impacto ambiental por el uso de los combustibles fósiles, desarrollar un bienestar social de la región e implementar metodologías para su sustentabilidad [42]. Para aportar en el crecimiento económico de la zona, emerge la necesidad de generar una distribución óptima de las unidades de generación de energía tomando en cuenta las existentes y con propuesta de implementar nuevas unidades de energía, las pérdidas de energía, la importación de energía, entre las regiones de control, las interconexiones transfronterizas, y los participantes en la cadena de suministro con el fin de evitar la interrupción de la misma, lo cual se pretende desarrollar mediante la minimización de funciones objetivo y la aplicación del esquema Multi-stakeholder.

1.6 HIPÓTESIS

La planificación, diseño de un sistema de energía nacional adecuado para los involucrados en la cadena de suministro de energía, permitirá una distribución adecuada de los participantes del sistema para el desarrollo económico de cada participante de la cadena además de obtener beneficios ambientales, económicos y sociales.

CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO

2.1 ENERGÍA ELÉCTRICA

2.2 SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

2.3 INTERCONEXIONES TRANSFRONTERIZAS

2.4 REGIONES DE TRANSMISIÓN

2.5 CONSUMO BRUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR REGIÓN DE CONTROL

2.6 CENTRALES ELÉCTRICAS

2.7 MONETIZACIÓN DE CO₂

2.8 ENERGÍAS RENOVABLES

2.9 OPTIMIZACIÓN

2.1 ENERGÍA ELÉCTRICA

La generación, el transporte y el consumo de las energías convencionales como toda actividad realizada por el ser humano, genera un impacto negativo sobre el medio ambiente, que puede argumentarse como el origen de algunos de los problemas con mayor relevancia para la humanidad, los problemas ambientales que sufre el planeta como el cambio climático, la lluvia ácida, calidad del aire, entre otros, ha sido tomado en cuenta desde unas décadas a la actualidad, fomentando proyectos, tecnologías, uso adecuado de insumos, reciclaje entre otras cosas, para minimizar el impacto ambiental negativo del hombre en el planeta, con el objetivo de mejorar la situación ambiental del mismo y en consecuencia aumentar la calidad de vida.

En México la primera unidad generadora de energía eléctrica se instaló en 1879 en León, Guanajuato para la industria textil, aquí comienza la historia eléctrica en el país. Un tiempo después las instalaciones de plantas de generación de energía eléctrica tomaran la importancia necesaria para suplir a las máquinas de vapor, que ofrecían ciertas ventajas en comparación con ellas, como la facilidad de distribución por el manejo menos complicado de cableado en comparación con las tuberías de gas. En México la producción de Energía Eléctrica comenzó en minas, fabricas, y solo la energía sobrante se distribuía a pueblos cercanos. En 1889 se instaló el primer central hidroeléctrica en Chihuahua con una capacidad de 22kW, en ese momento se inició el uso de fuentes de energía renovables para la generación de energía eléctrica, en ese momento represento un momento para la energía eléctrica, sin embargo, en ese momento no se escaló la importancia de este acontecimiento en el país ya que este tipo de plantas de energía tenían beneficios ambientales. Para 1905 la compañía canadiense llamada Mexican Light and Power Co, que se conoce como Luz y Fuerza que fue disuelta en 2008, era la compañía encargada de explotar el campo eléctrico en México, siendo un monopolio en la era de Porfirio Díaz.

La industria de la energía eléctrica creció exponencialmente, para 1926 el Código Eléctrico Nacional declaro como bien público a la electricidad, sin embargo, hasta la llegada de Lázaro Cárdenas a la presidencia fue que se promulgó la creación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), con el objetivo de ser una compañía reguladora y de encargarse de la generación distribución y suministro de la energía eléctrica. En 1960

la CFE adquiere la compañía Mexican Light and Power Co y cambia su nombre a Luz y Fuerza, también adquiere el 95% de Impulsora otra compañía encargada de la generación y distribución de energía eléctrica. Las concesiones privadas y activos terminaron poco tiempo después cuando se decidió cambiar la constitución con el objetivo de otorgarle toda la responsabilidad de generación, distribución, transmisión y suministros de energía eléctrica al estado.

CFE y Luz y Fuerza se convirtieron en las únicas empresas permitidas en el sistema eléctrico, sin embargo, en 1994 debido a la crisis del petróleo, CFE se encuentra en problemas económicos por lo que el sistema eléctrico se abre de nueva cuenta a la industria privada con el esquema de Productor Independiente de Energía (PIE), con la condicionante que la energía producida debía ser vendida a CFE. Las ventajas de la incorporación de PIE al sistema eléctrico permitieron la modernización del esquema de generación, así como las tecnologías usadas para la generación de energía eléctrica como fue Ciclo Combinado (CC). Con la incorporación de estos productores se crea el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), permitiendo tener un análisis, coordinación de la CFE y los PIE [43].

Una reforma eléctrica fue analizada para 2013, siendo propuesta desde 1998, esta reforma tenía el objetivo de liberar el sistema eléctrico a la iniciativa privada, permitiendo la inversión nacional o extranjera para la generación de energía.

Debido al esquema desarrollado hasta el momento, donde los principales recursos para la generación de energía eléctrica son los combustibles fósiles. El sistema de generación, distribución, suministro de energía eléctrica en México es llamado Sistema Eléctrico Nacional (SEN), incentivo la inversión en centrales de energía con fuentes de energía renovables con el objetivo de buscar objetivos ambientales, económicos y sociales [44].

2.2 SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

2.2.1 REGIONES DE CONTROL

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN), se compone por cuatro sistemas eléctricos aislados: Sistema Interconectado Nacional (SIN), que constituye la gran red eléctrica del

país, el Sistema Eléctrico Baja California (BC), el Sistema Eléctrico Baja California Sur (BCS) y el Sistema Eléctrico Mulegé (SEM).

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN), está integrado por 10 regiones de control, de las cuales 7 se encuentran interconectadas y conforman el Sistema Interconectado Nacional (SIN). En estas regiones de control se concentra el mayor consumo de energía eléctrica, por lo que el intercambio de los recursos y reservas de capacidad ante la diversidad de demandas y situaciones operativas hace posible un funcionamiento más económico y confiable.



Figura 2.1 Regiones de control del SEN. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

Las tres regiones de control, Baja California, Baja California Sur y Mulegé, eléctricamente aisladas del resto de la red eléctrica, se espera que se interconecten al SIN a partir de 2023 y 2024 respectivamente.

2.3 INTERCONEXIONES TRANSFRONTERIZAS

Existen 13 interconexiones internacionales en México con Norte y Centroamérica, de las cuales 11 se encuentran en la frontera con Estados Unidos de América y 2 con Centroamérica.

2.3.1 INTERCONEXIONES CON NORTEAMÉRICA

Existen cinco interconexiones de emergencia a lo largo de la frontera, las cuales son:

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

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

- 6) Tijuana-Miguel
- 7) La Rosita-Imperial Valley
- 8) Piedras Negras-Eagle Pass
- 9) Nuevo Laredo-Laredo
- 10) Cumbres F.-Planta Frontera
- 11) Cumbres F.-Railroad

2.3.2 INTERCONEXIONES CON CENTROAMÉRICA

Existen dos interconexiones internacionales con Centroamérica, una se localiza en Quintana Roo y se enlaza con Belice, y la otra se ubica en Chiapas y se interconecta con Guatemala:

12) Xul Ha-West

13) Tapachula-Los Brillantes

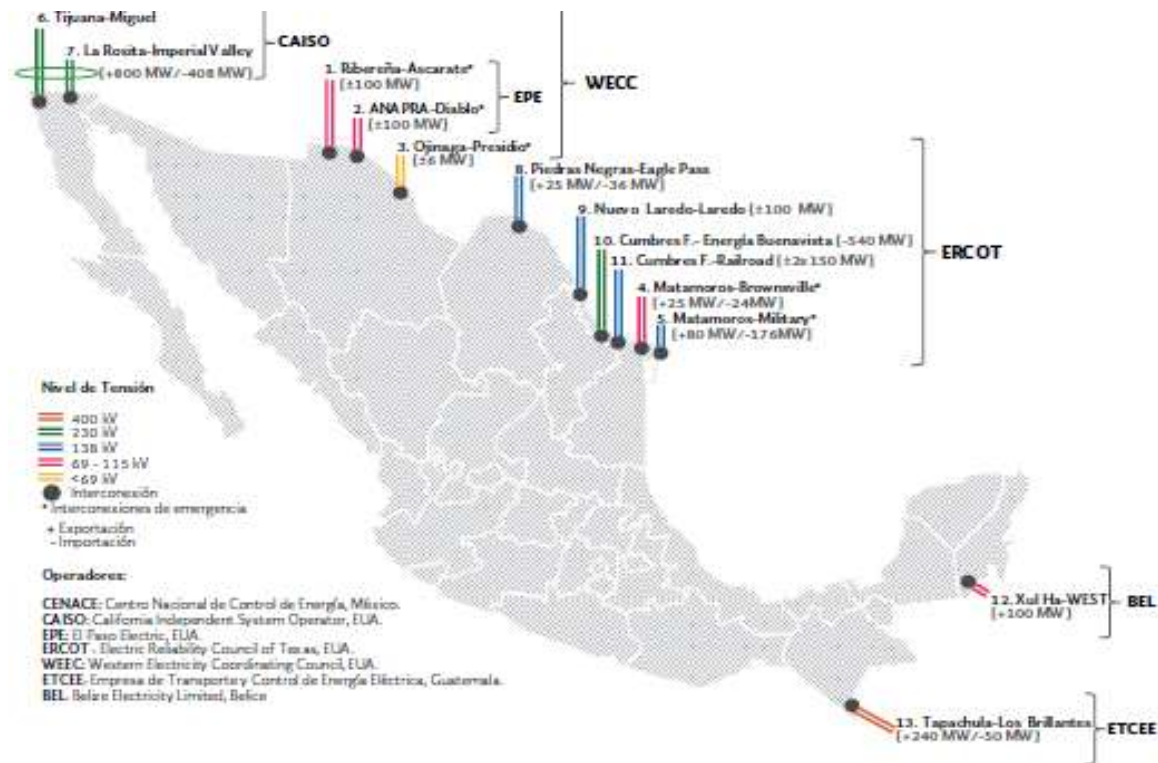


Figura 2.2 Interconexiones de energía transfronterizas. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

2.4 REGIONES DE TRANSMISIÓN

Las actividades de transmisión y distribución de energía eléctrica son consideradas áreas estratégicas y están reservadas al Estado Mexicano. El Sistema Eléctrico Nacional se encuentra conformado por una Red Nacional de Transmisión (RNT) distribuida a lo largo del territorio. La RNT se agrupa en 53 regiones de transmisión, de las cuales 45 están interconectadas entre sí por lo que conforman un total de 63 enlaces en el SIN; las seis

restantes pertenecen a los sistemas aislados de la Península de Baja California, 7 están interconectadas entre sí y conforman 6 enlaces en total.

2.4.1 CAPACIDAD DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

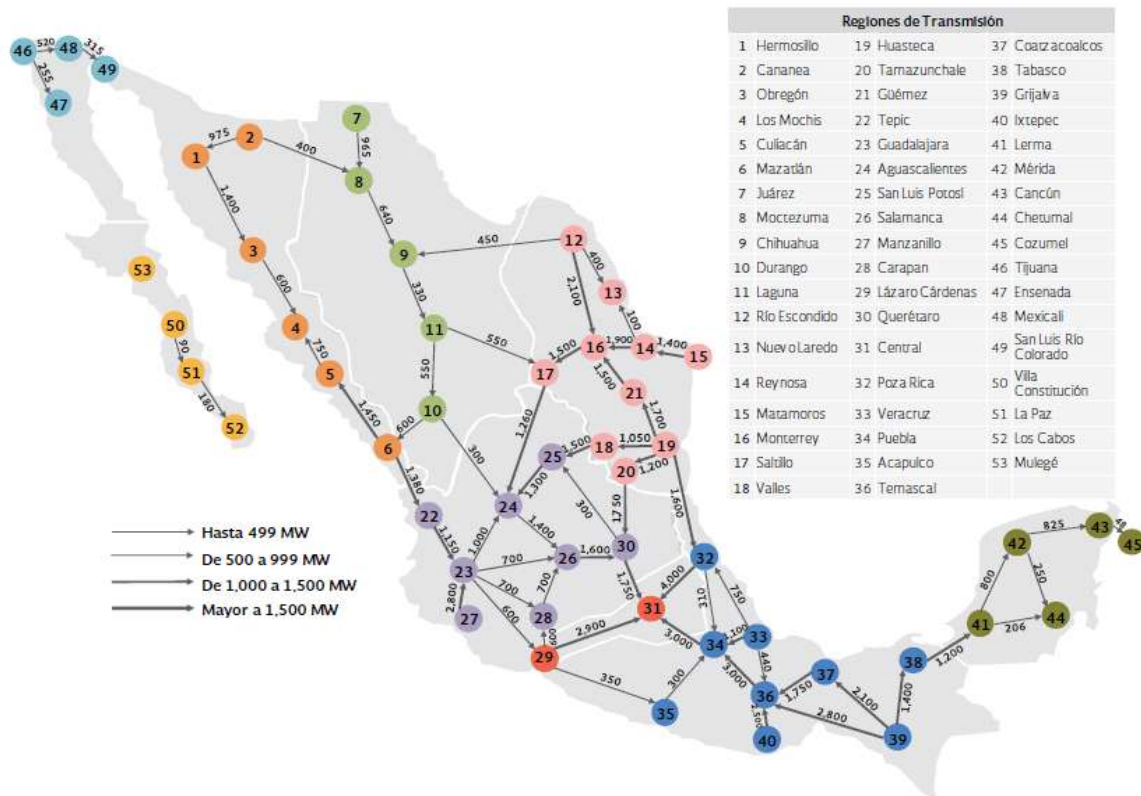


Figura 2.3 Líneas de transmisión del SEN. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

Las pérdidas de energía eléctrica en la distribución representan un gran tema de interés que debe ser considerado en la generación de energía en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), las pérdidas de energía se clasifican en dos ramas: técnicas y no técnicas. Las primeras se originan por la sobrecarga o calentamiento de los sistemas de distribución y transformación, las pérdidas no técnicas se derivan usos ilícitos, errores en la medición y fallas de medición.

En 2016, México registro un porcentaje de 5.98% de pérdidas técnicas del total de energía generada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), mientras que las pérdidas no

técnicas se estimaron en un 7.87% del total de la energía producida. El disminuir las pérdidas de energía puede generar beneficios para la generación de fuentes de energía renovables, ingresos para las mismas y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.5 CONSUMO BRUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR REGIÓN DE CONTROL

El consumo de energía eléctrica por región de control su puede ver en la **Tabla 2.1**, donde se muestra de igual manera el consumo por el Sistema Interconectado Nacional (SIN), y el consumo de todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), notamos que la región de control que más consumo apporto fue la región de control Occidental con el 21.53% del total (ver **Figura 2.4**), seguido de la región de control Central con 19.59%, luego la región de control Noreste con 17.57% y la región de control que menos energía consume fue la región de Mulegé 0.049%, seguido de Baja California Sur con el 0.84%. Notamos que el consumo de energía está en función de la densidad de población, las actividades productivas.



Figura 2.4 Consumo bruto de energía eléctrica por región de control. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

Tabla 2.1 Consumo bruto de energía eléctrica por región de control.

Región de Control	Consumo 2017 (GWh)
Central	60,685
Oriental	48,583
Occidental	66,696
Noroeste	24,293
Norte	25,949
Noreste	54,423
Peninsular	12,498
SIN	293,127
Baja California	13,825
Baja California Sur	2,622
Mulegé	152
SEN	309,727

2.5.1 CONSUMO BRUTO MENSUAL DEL SEN

A continuación, en la **Figura 2.5** se muestra la tendencia del consumo de energía eléctrica mensual en el Sistema Eléctrico Nacional.

(Gigawatt-hora)

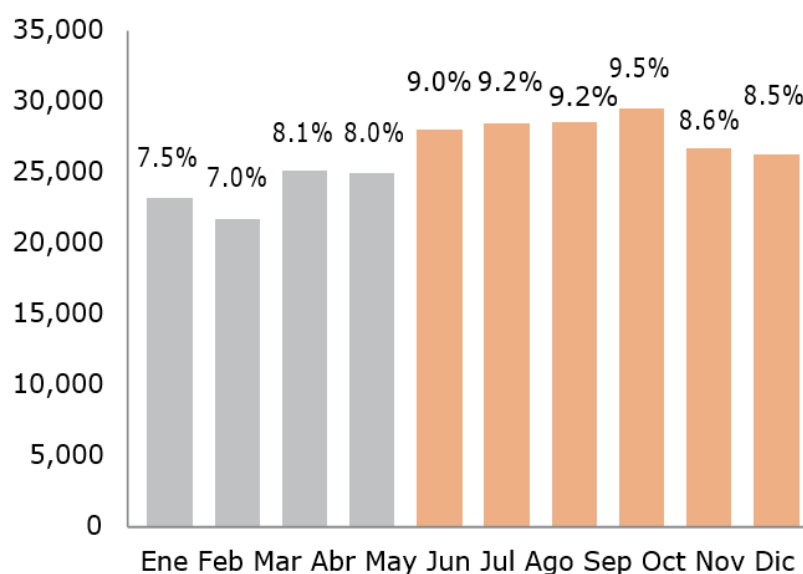


Figura 2.5 Consumo bruto mensual del SEN en 2017. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

2.6 CENTRALES ELÉCTRICAS

En el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) existen bastantes centrales generadoras de energía, las centrales eléctricas consideradas para este proyecto son 178 centrales eléctricas, las centrales consideradas son las descritas a continuación:

Tabla 2.2 Centrales de energía existentes en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

No.	Nombre de Central	Estado	Región de Control	Esquema	Tecnología	Capacidad (MW)
1	Petalcalco (Plutarco Elías Calles)	GRO	01-Central	GEN-CFE	CAR	2778
2	Valle de México_CC	MEX	01-Central	GEN-CFE	CC	549
3	Tlalnepantla Cogeneración	MEX	01-Central	COG	CE	28
4	Igsapak Cogeneración	HGO	01-Central	COG	CE	60
5	Infiernillo	MICH	01-Central	GEN-CFE	HID	1200
6	Generadora Fénix, Necaxa	PUE	01-Central	GEN	HID	109
7	Generadora Fénix, Patla	PUE	01-Central	GEN	HID	45
8	Generadora Fénix, Lerma (Tepuxtepec)	MICH	01-Central	GEN	HID	71
9	Generadora Fénix, Tepexic	PUE	01-Central	GEN	HID	45
10	Villita (José María Morelos)	MICH	01-Central	GEN-CFE	HID	320
11	Pemex-Refinación, Refinería Miguel Hidalgo	HGO	01-Central	COG	TER	134
12	Tula (Francisco Pérez Ríos) _TC	HGO	01-Central	GEN-CFE	TER	1606
13	Santa Cruz	CDMX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
14	Vallejo	MEX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
15	Magdalena	CDMX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
16	Ecatepec	MEX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
17	EVM Energía del Valle de México	MEX	01-Central	GEN	TG	129
18	Atenco	MEX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
19	Coapa	CDMX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
20	Iztapalapa	CDMX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
21	Remedios	MEX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
22	Victoria	MEX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
23	Aragón	CDMX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
24	Coyotepec	MEX	01-Central	GEN-CFE	TG	64
25	Cuautitlán	MEX	01-Central	GEN-CFE	TG	32
26	GAT Energía	VER	02-Oriental	COG	BIO	45
27	Piasa Cogeneración	VER	02-Oriental	COG	BIO	40
28	Centro	MOR	02-Oriental	GEN-CFE	CC	656

29	Pemex-Petroquímica, Complejo Petroquímico Morelos	VER	02-Oriental	COG	CC	172
30	Dos Bocas	VER	02-Oriental	GEN-CFE	CC	452
31	Pemex-Petroquímica, Complejo Petroquímico Cangrejera	VER	02-Oriental	COG	CC	164
32	Poza Rica	VER	02-Oriental	GEN-CFE	CC	232
33	Braskem Idesa	VER	02-Oriental	GEN	CC	176
34	Procter & Gamble Manufactura	TLAX	02-Oriental	COG	CC	60
35	Electricidad Aguila de Tuxpan, Tuxpan II (Tres Estrellas)	VER	02-Oriental	PIE	CC	495
36	San Lorenzo Potencia	PUE	02-Oriental	GEN-CFE	CC	382
37	Fuerza y Energía de Tuxpan, Tuxpan III y IV	VER	02-Oriental	PIE	CC	983
38	Electricidad Sol, de Tuxpan, Tuxpan V	VER	02-Oriental	PIE	CC	495
39	Cogeneración de Energía Limpia de Cosoleacaque	VER	02-Oriental	COG	CE	118
40	Sistemas Energéticos Sisa	VER	02-Oriental	COG	CE	64
41	Sistemas Energéticos Sisa, Planta II	VER	02-Oriental	COG	CE	64
42	Sky EPS Supply	PUE	02-Oriental	COG	CE	27
43	Energía Infra	VER	02-Oriental	COG	CE	145
44	Pemex-Gas y Petroquímica Básica, Complejo Procesador de Gas Nuevo Pemex	TAB	02-Oriental	COG	CE	367
45	Sky EPS Supply SM	PUE	02-Oriental	COG	CE	20
46	La Venta I-II	OAX	02-Oriental	GEN-CFE	EOL	84
47	Energías Renovables Venta III, La Venta III	OAX	02-Oriental	PIE	EOL	103
48	Energías Ambientales de Oaxaca, Oaxaca I	OAX	02-Oriental	PIE	EOL	102
49	CE Oaxaca Tres, Oaxaca III	OAX	02-Oriental	PIE	EOL	102
50	Energías Renovables La Mata, La Mata (Sureste I fase II)	OAX	02-Oriental	PIE	EOL	102
51	CE Oaxaca Dos, Oaxaca II	OAX	02-Oriental	PIE	EOL	102
52	CE Oaxaca Cuatro, Oaxaca IV	OAX	02-Oriental	PIE	EOL	102
53	Los Humeros	PUE	02-Oriental	GEN-CFE	GEO	69
54	Chicoasén (Manuel Moreno Torres)	CHIS	02-Oriental	GEN-CFE	HID	2400
55	Angostura (Belisario Domínguez)	CHIS	02-Oriental	GEN-CFE	HID	900
56	Caracal (Carlos Ramírez Ulloa)	GRO	02-Oriental	GEN-CFE	HID	600
57	Malpaso	CHIS	02-Oriental	GEN-CFE	HID	1080
58	Mazatepec	PUE	02-Oriental	GEN-CFE	HID	220
59	Peñitas (Ángel Albino Corzo)	CHIS	02-Oriental	GEN-CFE	HID	420
60	Temascal	OAX	02-Oriental	GEN-CFE	HID	354
61	Chilapan	VER	02-Oriental	GEN-CFE	HID	26
62	Tuxpango	VER	02-Oriental	GEN-CFE	HID	39
63	Laguna Verde	VER	02-Oriental	GEN-CFE	NUC	1608
64	Tuxpan (Adolfo López Mateos)	VER	02-Oriental	GEN-CFE	TER	2100

65	Pemex-Refinación, Refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime	OAX	02-Oriental	COG	TER	115
66	Pemex-Refinación, Refinería General Lázaro Cárdenas	VER	02-Oriental	COG	TER	64
67	Pemex-Exploración y Producción, Terminal Marítima Dos Bocas	TAB	02-Oriental	COG	TG	71
68	Pemex-Gas y Petroquímica Básica, Complejo Procesador de Gas Cactus	CHIS	02-Oriental	COG	TG	121
69	Pemex-Gas y Petroquímica Básica, Complejo Procesador de Gas Cd. Pemex	TAB	02-Oriental	COG	TG	59
70	Bio Pappel Printing	VER	02-Oriental	COG	TG	40
71	Tala Electric	JAL	03-Occidental	COG	BIO	25
72	Manzanillo (Gral. Manuel Álvarez Moreno)_CC	COL	03-Occidental	GEN-CFE	CC	1454
73	El Sáuz	QRO	03-Occidental	GEN-CFE	CC	591
74	Energía Azteca VIII, El Sáuz - Bajo	GTO	03-Occidental	PIE	CC	495
75	Cartones Ponderosa	QRO	03-Occidental	COG	CI	20
76	Los Azufres	MICH	03-Occidental	GEN-CFE	GEO	225
77	Agua Prieta (Valentín Gómez Farías)	JAL	03-Occidental	GEN-CFE	HID	240
78	La Yesca (Alfredo Elias Ayub)	JAL	03-Occidental	GEN-CFE	HID	750
79	El Cajón (Leonardo Rodríguez A.)	NAY	03-Occidental	GEN-CFE	HID	750
80	Aguamilpa Solidaridad	NAY	03-Occidental	GEN-CFE	HID	960
81	Santa Rosa (General Manuel M. Diéguez)	JAL	03-Occidental	GEN-CFE	HID	70
82	Cóbano	MICH	03-Occidental	GEN-CFE	HID	60
83	Zimapán (Fernando Hiriart Balderama)	HGO	03-Occidental	GEN-CFE	HID	292
84	Cupatitzio	MICH	03-Occidental	GEN-CFE	HID	80
85	Salamanca	GTO	03-Occidental	GEN-CFE	TER	550
86	Pemex-Refinación, Ing. Antonio M. Amor	GTO	03-Occidental	COG	TER	143
87	Manzanillo (Gral. Manuel Álvarez Moreno)_TC	COL	03-Occidental	GEN-CFE	TER	1300
88	Villa de Reyes	SLP	03-Occidental	GEN-CFE	TER	700
89	Cogeneración Salamanca	GTO	03-Occidental	GEN-CFE	TG	393
90	Hermosillo	SON	04-Noroeste	GEN-CFE	CC	227
91	Agua Prieta II	SON	04-Noroeste	GEN-CFE	CC	409
92	Fuerza y Energía de Hermosillo	SON	04-Noroeste	PIE	CC	250
93	Fuerza y Energía de Naco-Nogales, Naco Nogales	SON	04-Noroeste	PIE	CC	258
94	Huítes (Luis Donaldo Colosio)	SIN	04-Noroeste	GEN-CFE	HID	422
95	El Novillo (Plutarco Elías Calles)	SON	04-Noroeste	GEN-CFE	HID	135
96	Bacurato	SIN	04-Noroeste	GEN-CFE	HID	92
97	Comedero (Raúl J. Marsal)	SIN	04-Noroeste	GEN-CFE	HID	100
98	Humaya	SIN	04-Noroeste	GEN-CFE	HID	90
99	El Fuerte (27 de Septiembre)	SIN	04-Noroeste	GEN-CFE	HID	59

100	Guaymas II (Carlos Rodríguez Rivero)	SON	04-Noroeste	GEN-CFE	TER	484
101	Mazatlán II (José Aceves Pozos)	SIN	04-Noroeste	GEN-CFE	TER	616
102	Puerto Libertad	SON	04-Noroeste	GEN-CFE	TER	632
103	Topolobampo II (Juan de Dios Bátiz)	SIN	04-Noroeste	GEN-CFE	TER	320
104	Gómez Palacio	DGO	05-Norte	GEN-CFE	CC	240
105	Fuerza y Energía de Norte Durango	DGO	05-Norte	GEN	CC	132
106	Chihuahua II (El Encino)	CHIH	05-Norte	GEN-CFE	CC	619
107	KST Electric Power Company, Norte II	CHIH	05-Norte	PIE	CC	433
108	Iberdrola Energía La Laguna, La Laguna II	DGO	05-Norte	PIE	CC	498
109	Energía Chihuahua, Transalta Chihuahua	CHIH	05-Norte	PIE	CC	259
110	Fuerza y Energía de Norte Durango, Norte Durango	DGO	05-Norte	PIE	CC	450
111	Samalayuca II	CHIH	05-Norte	GEN-CFE	CC	522
112	Tai Durango Cinco	DGO	05-Norte	GEN	FV	30
113	Avant Energías Renovables I	CHIH	05-Norte	P.P.	FV	29
114	Boquilla	CHIH	05-Norte	GEN-CFE	HID	25
115	Francisco Villa	CHIH	05-Norte	GEN-CFE	TER	300
116	Samalayuca	CHIH	05-Norte	GEN-CFE	TER	316
117	Lerdo (Guadalupe Victoria)	DGO	05-Norte	GEN-CFE	TER	320
118	Bio Pappel	DGO	05-Norte	COG	TG	23
119	Tampico Renewable Energy	TAM	06-Noreste	COG	BIO	40
120	Bioenergía de Nuevo León	NL	06-Noreste	COG	BIO	17
121	Río Escondido (José López Portillo)	COAH	06-Noreste	GEN-CFE	CAR	1200
122	Carbón II	COAH	06-Noreste	GEN-CFE	CAR	1400
123	Huinalá_CC	NL	06-Noreste	GEN-CFE	CC	378
124	Altos Hornos de México	COAH	06-Noreste	GEN	CC	260
125	Río Bravo (Emilio Portes Gil)	TAMS	06-Noreste	GEN-CFE	CC	211
126	Central Lomas de Real, Río Bravo III	TAMS	06-Noreste	PIE	CC	495
127	Central Valle Hermoso, Río Bravo IV	TAMS	06-Noreste	PIE	CC	500
128	Huinalá II	NL	06-Noreste	GEN-CFE	CC	471
129	Iberdrola Energía del Golfo, Altamira V	TAMS	06-Noreste	PIE	CC	1121
130	Central Saltillo, Saltillo	COAH	06-Noreste	PIE	CC	248
131	Tractebel Energía de Monterrey	NL	06-Noreste	GEN	CC	284
132	Central Anáhuac, Río Bravo II	TAMS	06-Noreste	PIE	CC	495
133	Iberdrola Energía Tamazunchale, Tamazunchale	SLP	06-Noreste	PIE	CC	1135
134	Electricidad Aguila de Altamira, Altamira II	TAMS	06-Noreste	PIE	CC	495
135	Iberdrola Energía Monterrey, Monterrey III (Dulces Nombres)	NL	06-Noreste	PIE	CC	449
136	Iberdrola Energía Altamira, Altamira III y IV	TAMS	06-Noreste	PIE	CC	1036

137	Iberdrola Cogeneración Ramos	COAH	06-Noreste	COG	CE	60
138	Energía MK KF	TAMS	06-Noreste	COG	CE	36
139	Central Generadora Eléctrica Huinalá	NL	06-Noreste	EXP	CI	120
140	La Amistad	COAH	06-Noreste	GEN-CFE	HID	66
141	Río Bravo (Emilio Portes Gil) U3	TAMS	06-Noreste	GEN-CFE	TER	300
142	Pemex-Refinación, Refinería Francisco I. Madero	TAMS	06-Noreste	COG	TER	129
143	Pemex-Refinación, Refinería Ing. Hector Lara Sosa	NL	06-Noreste	COG	TER	79
144	Altamira	TAMS	06-Noreste	GEN-CFE	TER	500
145	Huinalá_TG	NL	06-Noreste	GEN-CFE	TG	150
146	Absormex CMPC Tissue	TAMS	06-Noreste	GEN	TG	22
147	Tractebel Energía de Pánuco	TAMS	06-Noreste	COG	TG	61
148	Enertek	TAMS	06-Noreste	COG	TG	168
149	Energía Campeche, Transalta Campeche	CAMP	07-Peninsular	PIE	CC	252
150	AES Mérida III; Mérida III	YUC	07-Peninsular	PIE	CC	484
151	Compañía de Generación Valladolid, Valladolid III	YUC	07-Peninsular	PIE	CC	525
152	Valladolid (Felipe Carrillo Puerto)_CC	YUC	07-Peninsular	GEN-CFE	CC	220
153	Valladolid (Felipe Carrillo Puerto)_TC	YUC	07-Peninsular	GEN-CFE	TER	75
154	Mérida II	YUC	07-Peninsular	GEN-CFE	TER	168
155	Lerma (Campeche)	CAMP	07-Peninsular	GEN-CFE	TER	113
156	Compañía de Nitrógeno de Cantarell	CAMP	07-Peninsular	COG	TG	363
157	Energía Azteca X_GEN	BC	08-Baja California	GEN	CC	219
158	Energía de Baja California	BC	08-Baja California	EXP	CC	337
159	Presidente Juárez_CC	BC	08-Baja California	GEN-CFE	CC	743
160	Termoeléctrica de Mexicali	BC	08-Baja California	EXP	CC	680
161	Iberdrola Energía Baja California	BC	08-Baja California	GEN	CC	30
162	Iberdrola Energía Baja California	BC	08-Baja California	PIE	CC	294
163	Energía Azteca X, Mexicali	BC	08-Baja California	PIE	CC	489
164	Energía Azteca X_EXP	BC	08-Baja California	EXP	CC	50
165	Fábrica de Papel San Francisco	BC	08-Baja California	COG	CE	23
166	Energía Sierra Juárez	BC	08-Baja California	EXP	EOL	156
167	Cerro Prieto III	BC	08-Baja California	GEN-CFE	GEO	220
168	Cerro Prieto II	BC	08-Baja California	GEN-CFE	GEO	220
169	Cerro Prieto I	BC	08-Baja California	GEN-CFE	GEO	30
170	Cerro Prieto IV	BC	08-Baja California	GEN-CFE	GEO	100
171	Presidente Juárez_TC	BC	08-Baja California	GEN-CFE	TER	320
172	Tijuana	BC	08-Baja California	CFE	TG	345
173	San Carlos (Agustín Olachea A.)	BCS	09-Baja California Sur	GEN-CFE	CI	104

174	Baja California Sur I	BCS	09-Baja California Sur	GEN-CFE	CI	210
175	Servicios Comerciales de Energía	BCS	09-Baja California Sur	P.P.	FV	30
176	Punta Prieta II_TC	BCS	09-Baja California Sur	GEN-CFE	TER	113
177	Los Cabos	BCS	09-Baja California Sur	GEN-CFE	TG	85
178	Minera y Metalúrgica del Boleo_COG	BCS	10-Mulegé	COG	TER	46

CC: ciclo combinado, TER: termoeléctrica, CAR: carboeléctrica, TG: turbogás, HID: hidroeléctrica, EOL: eólica, GEO: geotermoeléctrica, CI: combustión interna, FV: fotovoltaica, CE: cogeneración eficiente, NUC: nucleoeeléctrica y BIO: bioenergía.

CFE: Comisión Federal de Electricidad; COG: Cogeneración; GEN: Generación; GEN-CFE: Comisión Federal de Electricidad Generación. EXP: Exportación; PIE: Productor Independiente de Energía. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional.

2.7 MONETIZACIÓN DE CO₂

Anteriormente mencionamos el uso del CO₂ a partir de residuos industriales mediante el método de mineralización, este puede ser implementado a los procesos de producción de energía a partir de energías renovables con el fin de disminuir aún más el impacto ambiental y de manera simultánea obtener un beneficio económico. A continuación, describiremos el proceso de mineralización [45].

Existen dos principales metodologías para la mineralización una es la metodología de un solo paso y la otra la de dos pasos. La metodología de un solo paso se refiere a la mezcla de partículas de residuos en una solución acuosa donde el CO₂ se burbujea simultáneamente en el mismo reactor [46]. La metodología de dos pasos separa el proceso en dos, uno de estos es la lixiviación de los iones de calcio en la solución acuosa y el residuo se filtra para llevarlo al segundo paso que es la carbonatación lo cual es la fijación del CO₂ en los iones de calcio para formar carbonato de calcio el cual puede ser utilizado en la cerámica, y otras aplicaciones químicas con precios de aproximadamente 400 USD por tonelada.

El diseño de un proceso de mineralización fue propuesto donde se parte desde una unidad de trituración para los residuos industriales alcalinos con el fin de obtener un tamaño de partículas favorable para su reacción. Los residuos ya triturados se envían a una unidad de lixiviación donde son mezclados con agua, salmuera y una recirculación acuosa. Después de que estas partículas se han lixiviado, la solución se envía a un filtro para evitar partículas sólidas no deseadas. La solución ya filtrada se circula a través de una unidad de carbonatación en el cual se burbujea CO₂ para así mineralizar la solución.

Resultando una solución con precipitado de carbonato de calcio el cual es el producto deseado, dicha solución se circula a través de otro filtro para retirar el precipitado de carbonato de calcio de la solución [47].

2.8 ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables representan un nuevo ciclo, sin agotamiento de recursos, con menores residuos que las energías convencionales y un escenario preferente para la sostenibilidad energética. Su aprovechamiento generalizado y sistemático permitirá satisfacer las demandas de servicios energéticos, empleando recursos locales sin contaminar, siempre que se gestione de modo eficiente el consumo [48].

2.8.1 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica se deriva de la energía solar, ya que esta es producida por la diferencia de presión atmosférica la cual es provocada por las distintas temperaturas en el aire. Se estima que sólo el 1% o 2% de la energía solar recibida por la Tierra se convierte en energía cinética del viento, a pesar de solo convertir una pequeña fracción la energía eólica podría suministrar más electricidad que la total consumida en todo el planeta. La conversión de la energía del viento en electricidad se realiza por medio de aerogeneradores. Un aerogenerador alcanza una capacidad de energía similar a la de 1000 kg de petróleo.

El impacto ambiental de la energía eólica es muy pequeño comparado con otras fuentes energéticas, aunque se debe intentar reducir las posibles consecuencias negativas, especialmente en la avifauna y en el paisaje.

POTENCIAL DE ENERGÍA EÓLICA



Figura 2.6 Potencial de energía eólica. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

2.8.2 ENERGÍA GEOTÉRMICA

El gradiente térmico resultante de las altas temperaturas del centro del planeta, genera una corriente de calor hacia la superficie, corriente que es la fuente de la energía geotérmica. Las fuentes de energía geotérmica suelen ser:

- Los yacimientos de agua caliente son depósitos subterráneos de agua caliente a bajas profundidades que se encuentran a altas temperaturas, para aprovechar esta fuente de energía se deben realizar dos perforaciones por uno se extrae el agua caliente para explotar su poder calórico y por el otro se inyecta agua fría para lograr que el depósito no se agote y repita su ciclo al calentarse nuevamente.
- Yacimientos secos son depósitos de roca caliente, a profundidades más altas, pero se caracterizan por la ausencia de agua. Para explotar estos depósitos se procede a realizar una perforación hasta alcanzarlos y por otro extremo se realiza un segundo pozo que alcanzará también la roca caliente. Se introduce agua fría por una de las perforaciones que al entrar en contacto con la roca caliente se transforma

en vapor de agua que saldrá a presión por el segundo pozo perforado aprovechando de igual manera su poder calórico.

POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

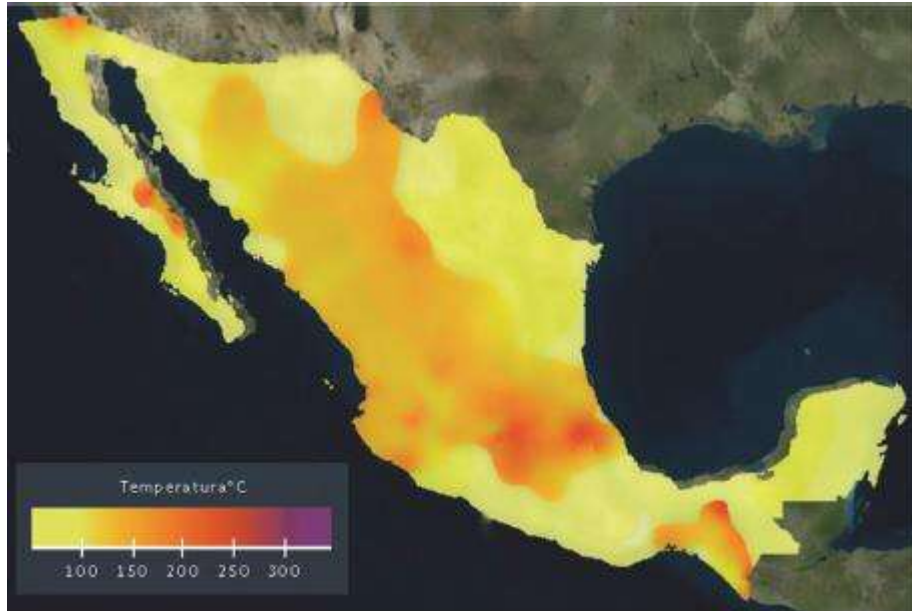


Figura 2.7 Potencial de energía geotérmica. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

2.8.3 ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Consiste en la generación de una fuerza electromotriz en un dispositivo semiconductor, debido a la absorción de la radiación luminosa. Al incidir la radiación del sol sobre una de las caras de una célula fotoeléctrica se produce una diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras que hace que los electrones salten de un lugar a otro, generando así corriente eléctrica. Actualmente, la mayoría de las células fotovoltaicas son de silicio monocristalino de gran pureza, material obtenido a partir de la arena, muy abundante en la naturaleza. La energía eléctrica generada mediante paneles fotovoltaicos es inagotable y no contamina, por lo que contribuye al desarrollo sostenible, sin embargo, la purificación del silicio es un proceso costoso, aunque en los últimos años ha disminuido considerablemente.

POTENCIAL DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

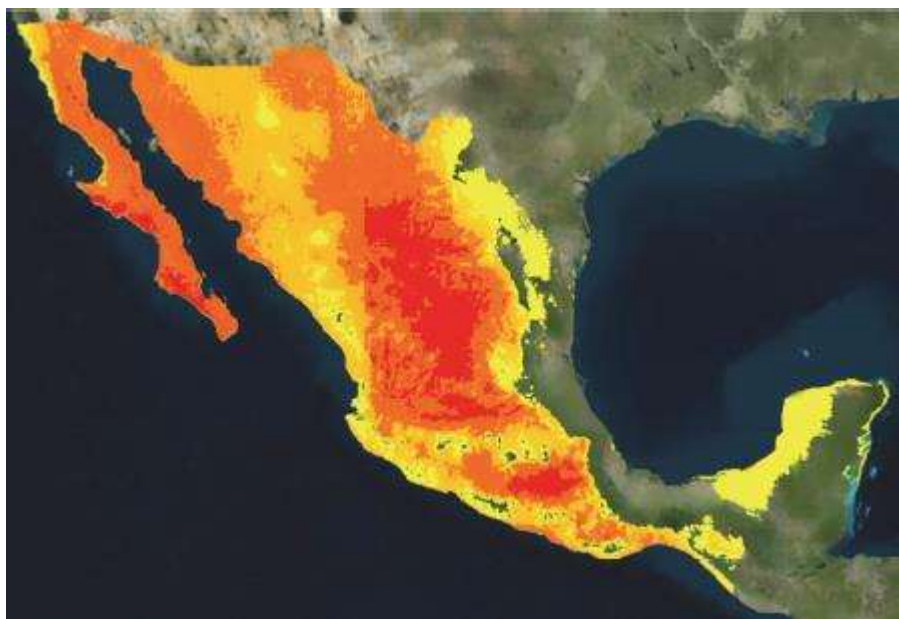


Figura 2.8 Potencial de energía fotovoltaica. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

2.8.4 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

La energía hidroeléctrica es aquella que aprovecha la energía potencial de una masa de agua haciéndola pasar a través de una turbina para convertirla en energía mecánica y finalmente en energía eléctrica. La electricidad generada por una caída de agua depende de la cantidad y de la velocidad del agua que pasa a través de la turbina, cuya eficiencia puede llegar al 90%. El aprovechamiento eléctrico del agua no produce un consumo físico de ésta. Las centrales hidroeléctricas en sí mismas no son contaminantes; sin embargo, su construcción produce numerosas alteraciones del territorio y de la fauna y flora. El potencial eléctrico aún sin aprovechar es enorme. Apenas se utiliza el 17% del potencial a nivel mundial.

2.8.5 ENERGÍA DE BIOMASA

Es un tipo de energía renovable procedente del aprovechamiento de la materia orgánica e industrial formada en algún proceso biológico o mecánico. Proviene de la energía solar, convertida en materia orgánica por la flora y fauna, que se puede recuperar por procesos termoquímicos o por procesos bioquímicos para luego ser consumida como

biocombustibles. Las principales aplicaciones de la biomasa son la calefacción, obtención de energía eléctrica y como combustible para transporte [49].

POTENCIAL DE ENERGÍA BIOMASA



Figura 2.9 Potencial de energía de biomasa. Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018).

2.9 OPTIMIZACIÓN

De tal manera que se ha manifestado la necesidad de desarrollar procesos para la producción de estas fuentes de energía renovables, con el objetivo de reducir el uso de estas energías convencionales, una de las alternativas es la planificación de un sistema energético sustentable, la cual ha sido estudiada desde aspectos de beneficios globales tanto económicos, sociales y ambientales, lo cual nos genera un problema multi-objetivo [50].

Comúnmente, en los problemas de optimización multi-objetivo surgen conflictos entre los criterios. Por lo que se busca una decisión donde haya equilibrio entre las múltiples partes interesadas, por lo que el enfoque de múltiples partes interesadas trata de identificar las mejores soluciones y las peores. Para resolver el problema de optimización de múltiples objetivos aplicando el enfoque de múltiples partes interesadas, primero se establecen las funciones objetivo [51]. Por lo tanto, es necesario maximizar y / o minimizar

cada función objetivo para determinar los límites inferior y superior para cada una de las funciones objetivo, lo que se define como los puntos de utopía y nadir.

El límite inferior de las funciones objetivo se refiere a la mejor solución que se puede obtener para cada objetivo y se le denomina punto de utopía, se refiere por ejemplo a la maximización de los beneficios y minimización de los riesgos. El punto de utopía suele ser una solución “ideal”, la cual no es viable para optimización multi-objetivo ya que al obtener la mejor solución para un objetivo se contraponen a otro y por lo tanto crea conflictos entre los mismos [52]. El límite inferior se refiere a la solución menos favorable para cada objetivo y se le denomina punto de nadir, por ejemplo, al maximizar las ganancias y el beneficio social se obtenga el peor valor para las emisiones. Luego, se establecen ponderaciones para reflejar las prioridades de los diferentes tomadores de decisiones para calcular las soluciones de compromiso para cada parte interesada. Finalmente, se obtiene una solución de compromiso global y una relación de insatisfacción de los interesados [53]. Un enfoque de optimización de objetivos múltiples tiene una dificultad enorme, ya que no es posible cuantificar que tan satisfechos están los involucrados con una decisión determinada.

Es el empleo de diferentes herramientas y métodos para determinar una solución competente y eficaz de un conjunto específico de parámetros sin violar alguna restricción en el proceso. Esta es una de las principales herramientas cuantitativas en la toma de decisiones. El objetivo de la optimización es determinar la mejor solución entre un número de soluciones dadas. Para optimizar un sistema se debe establecer una función objetivo, la cual trata de maximizar algún tipo de beneficio, o de minimizar algún tipo riesgo. Relaciones adicionales en forma de balance de materia, balance de energía, ecuaciones de diseño y estipulación de algunas variables constituyen restricciones bajo las cuales está sujeta la función objetivo. La aproximación más frecuente para resolver problemas de optimización consiste en clasificarlos de acuerdo con el tipo de función objetivo y al tipo de restricciones y desarrollar métodos específicos que aprovechen la estructura especial de dichos problemas.

CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA

3.1 SUPERESTRUCTURA

3.2 MODELO MATEMÁTICO

3.3 ENFOQUE MULTISTAKEHOLDER

3.1 SUPERESTRUCTURA

El caso de estudio se representa gráficamente en la **Figura 3.1**, en dicha figura se muestran las unidades generadoras de energía distribuidas en el país de acuerdo con su tecnología, con referencia al recuadro de la parte inferior izquierda representa la región de control Central, el recuadro superior derecho se muestra la región de control Noreste. Se consideraron los insumos para las unidades generadoras de energía eléctrica, las unidades de generación de energía, de igual manera se toma en cuenta los flujos de energía generados hacia la región de control para satisfacer la demanda de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas por las unidades de generación de energía, las pérdidas de energía por producción, las pérdidas de energía por transmisión y la interacción de importación o exportación de energía eléctrica dependiendo de la región de control.

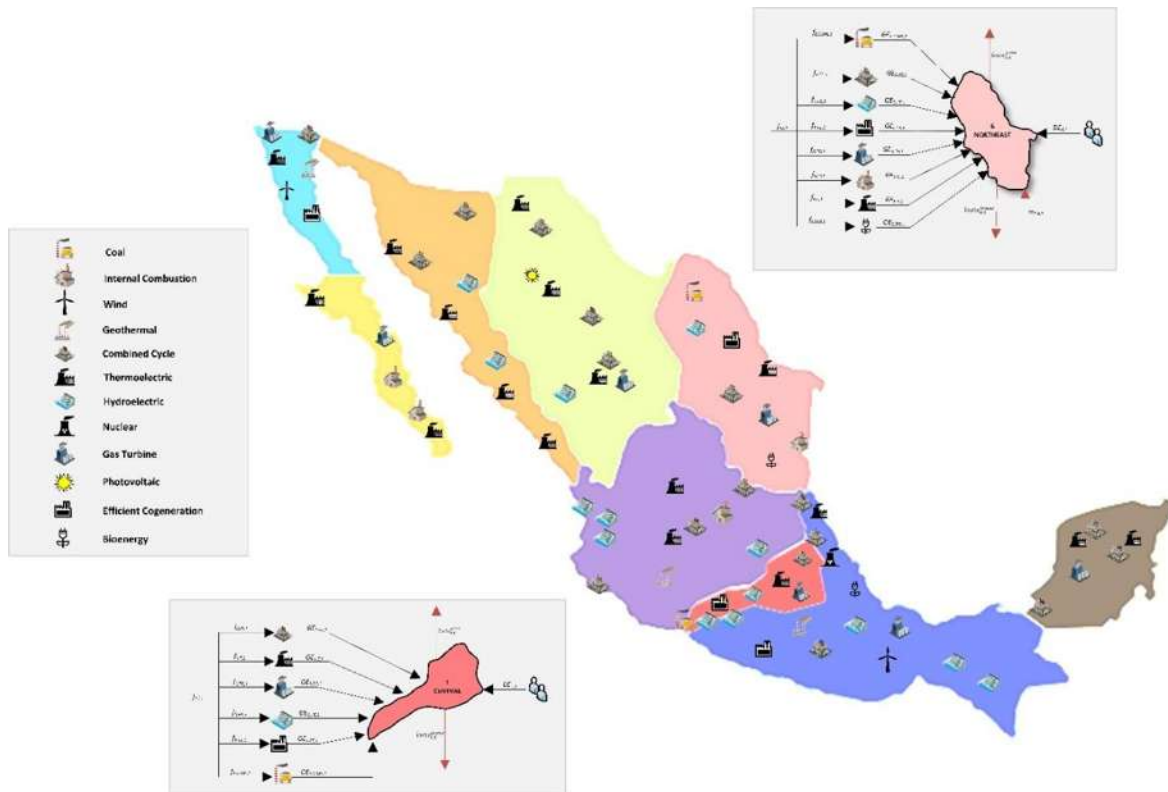


Figura 3.1 Superestructura.

Tabla 3.1 Principales Parámetros Utilizados Para el Estudio de Caso Abordado.

Parámetro	Unidades	Referencia
$\alpha_{i,j,t}^f$	GWh/hm ³ , GWh/Mm ² , GWh/ton	SENER, 2020 [56].
$\beta_{i,j}^{em}$	Ton/GWh	Stevens, L. et al., 2017 [58]
$\gamma_{i,j}^{water}$	Hm ³ /GWh	BENLESA 2019 [61]
$\delta_{i,j}^{land}$	Mm ² / GW-h	Stevens, L. et al., 2017 [58]
$\Phi_{i,j}^{lp}$	-	CENACE, 2018 [59]
$\tau_{i,i1}^{let}$	-	SENER, 2017 [57]
$CINV_{i,j2}$	Millones USD/GWh	PRODESEN, 2018 [54]
$DE_{i,t}$	GWh	PRODESEN, 2018 [54]
$ee_{i,t}^{cap}$	GWh	PRODESEN, 2018 [54]
$GE_{i,n}^{capn}$	GW	PRODESEN, 2018 [54]
$GE_{j,i,t}^{max}$	GWh	PRODESEN, 2018 [54]
$GE_{j,i,t}^{min}$	GWh	PRODESEN, 2018 [54]
IC_i	Millones USD/GWh	CFE, 2018 [60]

$ie_{i,t}^{cap}$	GW	PRODESEN, 2018 [54]
$POW_{i,j}^c$	GW	PRODESEN, 2018 [54]
TC	Millones USD/GW-h	CFE, 2018 [60]
$UFC_{i,j}$	Millones USD/GWh	PRODESEN, 2018 [54]
$UVC_{i,j}$	Millones USD/GWh	PRODESEN, 2018 [54]

3.2.1 BALANCE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA POR REGIÓN DE CONTROL.

La energía eléctrica generada en cada región de control para cada instalación generadora en un período de tiempo ($GEi_{i,t}^P$), debe ser igual al consumo de energía generada en cada región de control para un periodo de tiempo ($gēc_{i,t}$), más la energía enviada a otra región de control ($ges_{i,i1,t}$), considerando de igual manera las pérdidas que surgen en la producción de energía en cada región de control ($loste_{i,t}^{prod}$), más las pérdidas por transmisión en cada región de control en un periodo de tiempo ($loste_{i,t}^{trans}$), donde la energía exportada desde la región de control se suma si existe exportación desde la región:

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

Observe que debe haber una interconexión para enviar energía entre las regiones de control, lo que se modela a través de un parámetro binario ($Zs_{i,i1}$) que toma el valor de 1 cuando el sistema esta interconectado y cero cuando el sistema no está conectado.

(Z_i^{exp}) es un parámetro binario que es uno cuando la región (i) está interconectada con el vendedor externo, de lo contrario este parámetro binario es cero.

Además, la ($GEi_{i,t}^P$) debe ser igual la sumatoria de la energía producida por cada instalación generadora de energía (j) dentro de la región de control (i).

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

3.2.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR PRODUCCIÓN

En la producción de energía, una parte de dicha energía se pierde en cada región de control (i), durante el periodo de tiempo (t).

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

$\phi_{i,j,t}^{lp}$ son coeficientes que indican las pérdidas que ocurren en la generación de energía en las instalaciones para generación de energía de acuerdo con su tipo de tecnología.

3.2.3 LÍMITE PARA LA ENERGÍA EXPORTADA

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

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

3.2.4 BALANCE PARA DEMANDA DE ENERGÍA POR REGIÓN DE CONTROL

$$DE_{i,t} = gec_{i,t} + \sum_{il} ges_{il,i,t} (1 - \tau_{i,il}^{let}) Zs_{i,i} + ie_{i,t} Z_i^{imp}, \quad \forall i,t \quad (5)$$

La demanda de energía en cada zona (i) en cada período de tiempo (t), debe ser satisfecha por consumo de energía generada en cada región de control para un periodo de tiempo ($gec_{i,t}$), la energía generada en cada región recibida desde otra región representada por la energía enviada ($ges_{il,i,t}$) menos las pérdidas de energía por transmisión siendo ($\tau_{i,il}^{let}$) un coeficiente de pérdidas de transmisión y donde ($Zs_{i,i}$) es un parámetro binario que toma el valor de 1 cuando el sistema esta interconectado y cero cuando el sistema no está conectado, más las importaciones a la región en un periodo de tiempo ($ie_{i,t}$), donde (Z_i^{imp}) es un parámetro binario que es uno cuando la región (i) está interconectada con el vendedor externo, de lo contrario este parámetro binario es cero.

3.2.5 LÍMITES PARA LA ENERGÍA TRANSMITIDA ENTRA LAS REGIONES DE CONTROL E IMPORTACIÓN POR AGENTES EXTERNOS

Se debe tomar en cuenta que entre las diferentes regiones de control existen líneas de transmisión de energía con diferentes voltajes, la energía que se puede transmitir entre las regiones ($ges_{i,il,t}$) debe estar limitada por la capacidad que pueden soportar dichas líneas de transmisión ($ges_{i,il,t}^{cap}$) ya que debe ser menor a la que puede soportar, de la misma manera que para la energía importada desde agentes externos en convenio.

Energía importada

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

Energía enviada

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

3.2.6 PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR TRANSMISIÓN

$$loste_{i,t}^{trans} = \sum_{il} ges_{i,il,t} \tau_{i,il}^{let} \quad \forall i,t \quad (8)$$

Tenga en cuenta que las pérdidas por transmisión de cada región dependen de ($\tau_{i,il}^{let}$), el cual es un coeficiente de pérdida por transmisión que representa una parte de la energía generada en la región ($i1$), desde la instalación generadora (j), enviada a la región (i) en un período de tiempo (t).

3.2.7 GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LAS INSTALACIONES GENERADORAS

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

$$GE_{i,j,t}^P = f_{i,j,t}^f \alpha_{i,j,t}^f \quad \forall i, j, t \quad (9)$$

3.2.8 LÍMITES PARA LA ENERGÍA GENERADA POR INSTALACIONES DE GENERACIÓN

Tenga en cuenta que ($GE_{i,j,t}^P$) debe estar entre la capacidad mínima ($GE_{i,j,t}^{\min}$) y máxima ($GE_{i,j,t}^{\max}$) instalada para la planta existente o nueva en la región (i) durante el período de tiempo (t). ($y_{i,j}$) es una variable binaria que indica que la instalación (j) debe ser usada o no en el futuro.

$$GE_{i,j,t}^{\min} (y_{i,j}) \leq GE_{i,j,t}^P, \quad \forall i, j, t \quad (10)$$

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

3.2.9 CAPACIDAD DE LAS INSTALACIONES

Para las instalaciones existentes, la capacidad POW_{ij1}^e es un parámetro conocido; sin embargo, para las instalaciones nuevas el tamaño debe ser determinado de la siguiente manera:

$$POW_{i,j2}^n \geq GE_{i,j2,t}^P, \quad \forall i, j2, t \quad (12)$$

3.2.10 COSTO OPERATIVO PARA DIFERENTES INSTALACIONES DE GENERACIÓN EXISTENTES

$$OptCost_{i,j1}^e = UFC_{ij1}^e POW_{ij1}^e y_{i,j1} + \sum_t UVC_{ij1}^e GE_{i,j1,t}^P, \quad \forall i, j1 \quad (13)$$

Los costos operativos y de mantenimiento, surgen de los costos unitarios de operación y mantenimiento ($UFC_{i,j1}$), estos dependen de la región de control (i) y del tipo de tecnología de cada instalación de energía existente ($j1$), multiplicado por la potencia o capacidad de las instalaciones de energía existentes (POW_{ij1}^e), más los costos variables de operación y mantenimiento (UVC_{ij1}) por la generación de energía en cada instalación de energía existente ($GE_{ij1,t}^P$), lo que determina estos costos.

3.2.11 COSTO OPERATIVO PARA DIFERENTES INSTALACIONES DE GENERACIÓN NUEVAS

$$OptCost_{i,j2}^n = UFC_{i,j2}^n POW_{i,j2}^n + \sum_t UVC_{i,j2}^n GE_{i,j2,t}^P, \quad \forall i, j2 \quad (14)$$

3.2.12 COSTO DE CAPITAL PARA INSTALACIONES DE GENERACIÓN NUEVAS

Luego, el costo de capital para las nuevas instalaciones se determina con la siguiente ecuación, donde ($CINV_{i,j2}$) son los costos de inversión por cada instalación de energía nueva que dependía de la región de control (i) y de la instalación nueva ($j2$), y ($GE_{i,j2}^P$) es la energía que se generó en las instalaciones de energía nuevas.

$$CapCost_{i,j2}^n = CINF_{i,j2}^n y_{i,j2} + CINV_{i,j2}^n POW_{i,j2}^n, \quad \forall i, j2 \quad (15)$$

El costo de capital para las instalaciones existentes es cero.

$$CapCost_{i,j1}^e = 0 \quad \forall i, j1 \quad (16)$$

3.2.13 COSTOS POR IMPORTACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA

Los costos de transportación dependen de la línea de transmisión, de acuerdo con el voltaje se reporta el costo por GWh transportado de una región de control a otra, y que depende de la cantidad de energía transportada de la región i a la región $i1$.

$$TCost_{i,i1} = TC \sum_t ges_{i,i1,t} \quad \forall i, i1 \quad (17)$$

Existen costos establecidos para la importación de energía desde los agentes externos hacia las regiones de control i que están interconectadas a estos, estos costos dependen de la región de importación IC_i y de la cantidad de energía importada.

$$ICost_i = IC_i \sum_t ie_{i,t} \quad \forall i \quad (18)$$

3.2.14 COSTO TOTAL ANUAL

$$TAC = \sum_i \sum_{j1} OptCost_{i,j1}^e + \sum_i \sum_{j2} OptCost_{i,j2}^n + k_F \sum_i \sum_{j2} CapCost_{i,j2}^n + \sum_i \sum_{i1} TCost_{i,i1} + \sum_i ICost_i \quad (19)$$

Los costos totales para cada instalación de generación (j) en cada región (i), están determinados por los costos operativos ($OptCost_{i,j}$), más los costos de capital anuales para cada instalación ($CapCost_{i,j}$). Donde (k_F) es el factor de carga fija que anualiza la inversión y depende de la tasa de interés, así como de la vida útil de la planta. Este puede ser distinto para cada instalación (j)

En general, el costo total anual (TAC) se define como la suma de los costos anuales totales de cada instalación.

3.2.15 EMISIONES

$$EmPlant_{i,j} = \sum_t f_{i,j,t}^f \beta_{i,j}^{em} \quad \forall i, j \quad (20)$$

Tenga en cuenta que ($\beta_{i,j}^{em}$) es un factor de recuperación para las emisiones por la combustión de los recursos y ($f_{i,j,t}$) es el recurso utilizado en cada región y por las instalaciones, este conjunto representa las emisiones de cada instalación ($EmPlant_{i,j}$).

- Emisiones totales anuales

$$TEm = \sum_i \sum_j EmPlant_{i,j} \quad (21)$$

3.2.16 AGUA UTILIZADA

$$WaterPlant_{i,j} = \sum_t GE_{i,j,t}^P \gamma_{i,j}^{water} \quad \forall i, j \quad (22)$$

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

- Consumo total anual de agua

$$TWater = \sum_i \sum_j WaterPlant_{i,j} \quad (23)$$

3.2.17 TIERRA UTILIZADA

$$LandPlant_{i,j} = \sum_t GE_{i,j,t}^P \delta_{i,j}^{land} \quad \forall i, j \quad (24)$$

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

- Tierra total utilizada

$$TLa = \sum_i \sum_j LandPlant_{i,j} \quad (25)$$

3.4 ENFOQUE MULTISTAKEHOLDER

El enfoque de múltiples partes interesadas se refiere a la participación de todos los participantes que conforman el sistema. Minimizando cada uno de los objetivos los cuales son el Costo Total Anual (TAC), las Emisiones Totales de Energía por las unidades de generación (TEM), el Consumo Total de Agua de las unidades de generación (TWATER), lo es posible crear el punto utópico con los menores valores obtenidos de cada objetivo. El Punto Utópico es una solución infactible ya que representa la solución ideal y los

objetivos se contraponen por llegar a la solución factible. El enfoque multiobjetivo propuesto para solucionar el modelo matemático MIP consta en crear una nueva función objetivo la cual involucre minimizar los valores de los objetivos anteriormente propuestos.

$$\text{Min} [\omega(TAC) + \omega(TEM) + \omega(TWATER)] \quad (26)$$

Cada índice de la función objetivo nueva estará multiplicada por un peso aleatorio (ω), esto permitirá encontrar soluciones dando diferentes prioridades para ser satisfechas y finalmente conocer el comportamiento de las funciones.

CAPÍTULO 4 : RESULTADOS.

4.1 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO

4.2 RESULTADOS ENFOQUE MULTI-STAKEHOLDER

4.1 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo de optimización está compuesto por 41,357 variables continuas, 169,782 ecuaciones y 401 variables binarias, el modelo matemático antes expuesto se codificó a través del software GAMS, es un problema MIP que se resolvió con el solucionador CPLEX (GAMS, 2020). El modelo de optimización se resolvió considerando objetivos individuales por separado.

En el modelo matemático se consideró el análisis de tres escenarios, donde la solución factible e individual encontrada de los objetivos propuestos se realizó a través de la minimización de funciones objetivo tales como el Costo Anual Total (TAC), el Consumo Total de Agua por Instalaciones de Energía (TWATER) y las Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero emitidas por las Instalaciones de Energía (TEM). La **Tabla 4.1** muestra los resultados de la minimización de cada función objetivo, donde se consideró mostrar los resultados adicionales obtenidos para algunas variables del modelo matemático con el fin de ampliar el análisis del mismo o en este caso del Sistema Eléctrico Nacional. (SEN).

Tabla 4.1 Resultados del modelo matemático con objetivos individuales.

	MIN TAC (Millones USD/año)	MIN TEM (Millones Ton/año)	MIN TWATER (Hm ³ /año)
TAC (Millones USD/año)	69,572.100	232,166.000	364,705.000
TWATER (Hm ³ /año)	475.451	306.676	188.546
TEM (Millones ton/año)	10,958.87	85.361	1,637.314
TLa (Mm ² /año)	144.450	152.563	33.694
OptCost (Millones USD/año)	64,121.000	224,002.000	354,414.000
ICost (Millones USD/año)	5,436.000	5,154.000	5,436.000
TCost (Millones USD/año)	15.000	26.000	39.000
CapCost (Millones USD/año)	0.000	3,013.000	4,817.000
Loste ^{trans} (GWh/año)	39.311	153.136	327.053
Lost ^{ep} (GWh/año)	6,271.693	7,171.370	9,314.146
GEi (GWh/año)	265,682.601	267,639.212	269,012.796
DE (GWh/año)	275,489.998	275,489.998	275,489.998
ie (GWh/año)	16,118.400	15,175.292	16,118.400
POW ⁿ (GW)	0.000	5.267	8.041

El límite superior (Punto Nadir) y el punto inferior que conforma la solución óptima (Punto Utópico), las soluciones obtenidas para el modelo matemático propuesto se muestran en la **Figura 4.1**, el Punto Utópico es una solución infactible ya que representa la solución ideal.

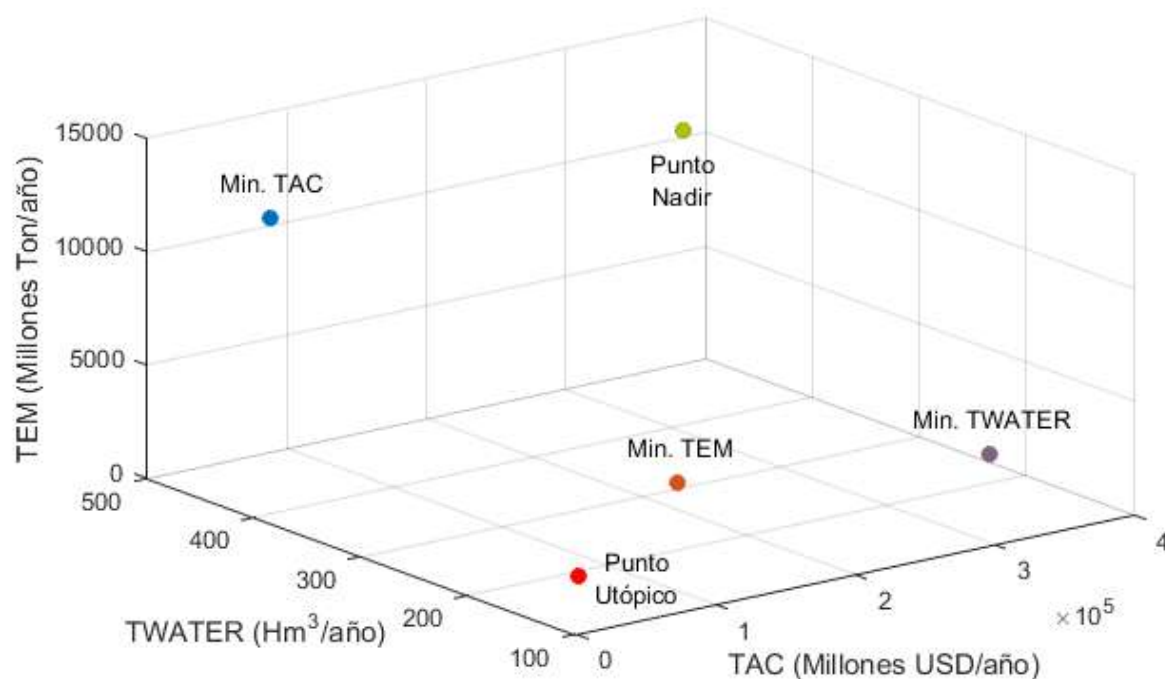


Figura 4.1 Representación gráfica de los resultados del modelo matemático con objetivos individuales.

La solución para el escenario donde se minimiza el Consumo Total de Agua por Instalaciones de Energía (TWATER), el modelo genera un valor 188.546 Hm³/año (ver **Figura 4.1**), mostrando un 60.34% menor que el escenario que minimiza el Costo Total Anual (TAC), para el escenario donde se minimiza las Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero emitidas por las Instalaciones de Energía (TEM) la diferencia es un 38.52% menor. Como podemos observar en la **Tabla 4.1**, los costos de operación y mantenimiento para las instalaciones de energía aportan el 97.17% de los Costos Totales Anuales (TAC), los costos por importación de energía (ICost) representan el 1.49% aproximadamente de los costos totales anuales, los costos de capital (CapCost)

determinados por instalaciones de energía nuevas representaron el 1.32% y los costos por transferencia (TCost) de energía representaron el porcentaje restante que es el 0.01% para completar el 100% de los costos totales anuales, de igual manera se satisface el 100% de la demanda de energía teniendo en cuenta que la demanda de energía en el país es de 275'489.988 GWh/año.

El escenario en el cual se minimiza las Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero emitidas por las Instalaciones de Energía (TEM), la solución muestra un valor de 85.361 Millones Ton/año de gases de efecto invernadero (ver **Figura 4.1**), que representa el 5.21% de las Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero emitidas por las Instalaciones de Energía (TEM), del escenario donde se minimizo el Consumo Total de Agua por Instalaciones de Energía (TWATER), para el escenario donde se minimizo el Costo Total Anual (TAC) la solución represento el 7.79% de las Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero emitidas por las Instalaciones de Energía (TEM), en la **Tabla 4.1**, los costos de operación representan el 96.48% de los Costos Totales Anuales (TAC), los costos de importación (ICost) representaron aproximadamente el 2.22% de los Costos Totales Anuales (TAC), los costos de capital (CapCost) son el 1.29% de los costos totales anuales, los costos por transporte de energía (TCost) entre regiones de control represento el 0.011%, de igual manera al escenario anterior se logró satisfacer la demanda total del país.

La función objetivo del Costo Total Anual (TAC) se minimizo en el siguiente escenario donde se encontró una solución con el valor de 69,572.1 de Millones USD/año (ver **Figura 4.1**), que represento el 29.96% de los Costos Totales Anuales (TAC) que se encontraron en el escenario donde se minimizaron las Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero emitidas por las Instalaciones de Energía (TEM) y el 19.07% del valor del Costo Total Anual (TAC) que se encontró en el escenario donde se minimizo el Consumo Total de Agua por Instalaciones de Energía (TWATER), en el escenario donde se minimizo el Costo Total Anual (TAC) se analizaron los costos y su inferencia en la función objetivo, los costos de operación representaron el 92.16% del Costo Total Anual (TAC), los costos de importación de energía (ICost) representaron el 7.81%, los costos de capital (CapCost) fueron cero debido a que este escenario no considero la instalación de

nuevas unidades de energía, los costos por transporte de energía (TCost) representaron el 0.021% del Costo Total Anual (TAC).

4.1.1 UNIDADES O INSTALACIONES DE ENERGÍA

Los escenarios descritos anteriormente tienen resultados específicos como el uso o aprovechamiento de unidades o instalaciones generadoras de energía, en los resultados se notó que difería el uso de unidades de energía para la producción de la misma, esto con el fin de encontrar la mejor solución para la función objetivo.

El escenario donde se minimizó el Costo Total Anual (TAC), al encontrar la solución factible de este modelo matemático se analizaron las unidades de energía consideradas para la generación de energía con el fin de satisfacer la demanda de energía del país de 275,489.988 GWh/año, en la región de control Central (1) se consideraron 7 unidades de generación de energía, en la región de control Oriental (2) se utilizaron 21 instalaciones de energía, en la región de control Occidental (3) se utilizaron 14 unidades de generación de energía, en la región de control Noroeste (4) se utilizaron 10 centrales de generación de energía, en la región de control Norte (5) se consideraron 11 instalaciones generadoras de energía, para la región de control Noreste (6) se usaron 13 centrales de energía, en la región de control Peninsular (7) se consideraron 3 unidades de generación de energía, en la región de control Baja California (8) se utilizaron 7 instalaciones de generación de energía, para la región de control Baja California Sur (9) se consideraron 4 instalaciones

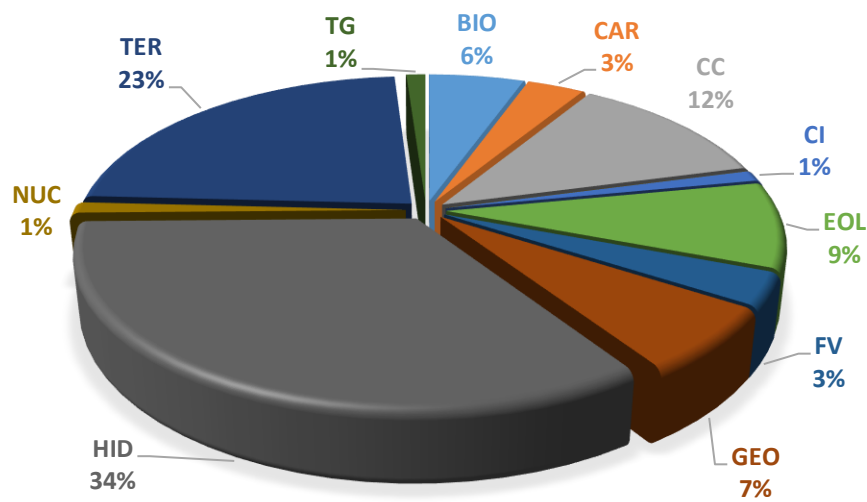


Figura 4.2 Porcentaje de participación por tecnología para el escenario 1.

de generación de energía, para la región de control Mulegé (10) se consideró 1 unidad de generación de energía y no se consideró la instalación de nuevas unidades de energía teniendo un total de 91 instalaciones de energía consideradas, en la **Figura 4.2** se muestra el porcentaje de importancia según la tecnología en la generación de energía para este escenario.

En la **Figura 4.3** se puede observar el porcentaje que constituye cada tipo de tecnología para la generación de energía para el escenario donde se minimizaron las Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero emitidas por las Instalaciones de Energía (TEM), siendo la energía Hidroeléctrica (HID) la tecnología que con mayor aportación a la generación de energía. En este escenario, para la región de control Central (1) se consideraron 9 unidades de generación de energía, en la región de control Oriental (2) se utilizaron 28 instalaciones de energía, en la región de control Occidental (3) se utilizaron 14 instalaciones de generación de energía, en la región de control Noroeste (4) se utilizaron 12 unidades de generación de energía, en la región de control Norte (5) se consideraron 11 centrales generadoras de energía, para la región de control Noreste (6) se usaron 16 instalaciones de generación de energía, en la región de control Peninsular (7) se consideraron 2 unidades de generación de energía, en la región de control Baja California (8) se utilizaron 6 instalaciones de generación de energía, para la región de control Baja California Sur (9) se consideraron 4 instalaciones de generación de energía, para la región de control Mulegé (10) se consideró 1 unidad de generación de energía, teniendo un total de 103 unidades de energía consideradas de las cuales 14 son instalaciones de energía nuevas.

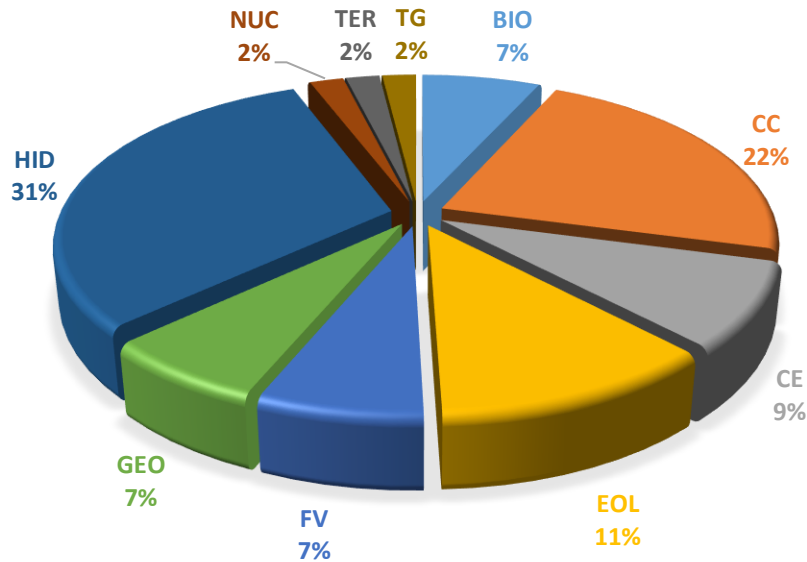


Figura 4.3 Porcentaje de participación por tecnología para el escenario 2.

Minimizando el Consumo Total de Agua por Instalaciones de Energía (TWATER), se notó que la tecnología que mayor aportación a la generación de energía fue Ciclo Combinado (CC) con un 54% de aportación del total de la generación (ver **Figura 4.4**). La consideración de las unidades de generación de energía para este escenario fueron: para la región de control Central (1) se consideraron 9 instalaciones de generación de energía, en la región de control Oriental (2) se utilizaron 23 unidades de energía, en la región de control Occidental (3) se utilizaron 8 centrales de generación de energía, en la región de control Noroeste (4) se utilizaron 7 unidades de generación de energía, en la región de control Norte (5) se consideraron 12 centrales generadoras de energía, para la región de control Noreste (6) se usaron 19 unidades de energía, en la región de control Peninsular (7) se consideraron 4 instalaciones de generación de energía, en la región de control Baja California (8) se utilizaron 4 centrales de generación de energía, para la región de control Baja California Sur (9) se consideraron 3 unidades de generación de energía, para la región de control Mulegé (10) se consideró 1 instalación de generación de energía, el total de las instalaciones generadoras de energía para este escenario es de 90, de las cuales 15 son nuevas instalaciones generadoras de energía, con el objetivo de satisfacer la demanda de energía en el país (ver **Tabla 4.1**).

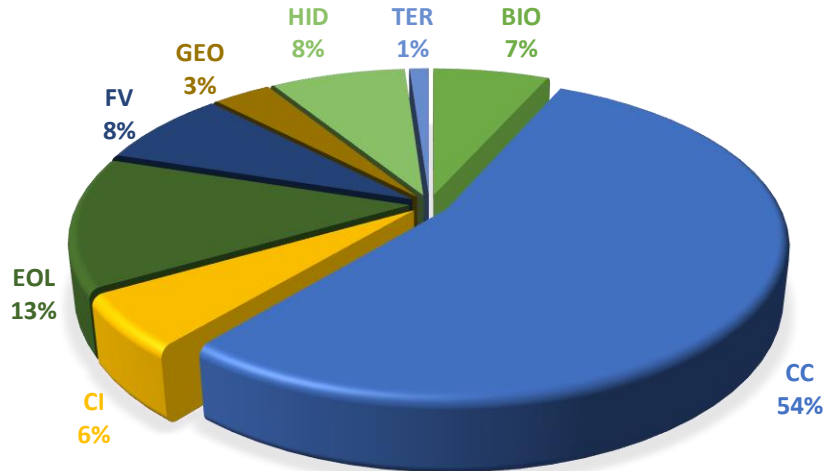


Figura 4.4 Porcentaje de participación por tecnología para el escenario 3.

4.1.2 TRANSFERENCIA DE ENERGÍA ENTRE REGIONES DE CONTROL E IMPORTACIÓN.

En el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) existen 10 regiones de control, de las cuales solo 7 regiones de control están interconectadas formando el Sistema Interconectado Nacional (SIN), sin embargo, para los escenarios analizados solo algunas regiones de control realizan intercambio de energía, en la **Tabla 4.2** se muestra la energía intercambiada o transferida entre regiones de control para el escenario donde se minimizó el Costo Total Anual (TAC), en la **Tabla 4.3** se observa para el escenario de minimización de las Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero emitidas por las Instalaciones de Energía (TEM) el intercambio de energía entre las regiones de control, para el último escenario donde se minimizó el Consumo Total de Agua por Instalaciones de Energía (TWATER) la energía transferida se muestra en la **Tabla 4.4**.

Tabla 4.2 Transferencia de energía entre regiones de control para el escenario 1.

MIN TAC (Millones USD/año)		
Región de envío	Región de recepción	GWh/año
2	1	15,020.776
2	7	10,170.826
4	3	3,754.864

Tabla 4.3 Transferencia de energía entre regiones de control para el escenario 2.

MIN TEM (Millones Ton/año)		
Región de envío	Región de recepción	GWh/año
2	1	36,560.623
2	7	4,946.127
3	1	24.222
4	3	208.99
5	3	2628
5	4	1752
5	6	876
6	3	2,289.076

Tabla 4.4 Transferencia de energía entre regiones de control para el escenario 3.

MIN TWATER (Hm³/año)		
Región de envío	Región de recepción	GWh/año
2	1	21,129.638
3	1	7,236.896
4	3	85.2
5	3	2628
5	4	1752
5	6	876
6	2	14016
6	3	25,534.446

La **Figura 4.5** es una representación gráfica entre dos regiones de control, esto sucede para todas las regiones de control de acuerdo a su interacción de energía, si existe exportación, importación, transferencia de energía entre las mismas, pérdidas de energía por producción o por transferencia, el recurso utilizado para la generación de energía. El valor de la importación de energía para los tres escenarios se muestra en la **Tabla 4.1**, sin embargo, no todas las regiones que presentan una interconexión fronteriza de energía se activaron durante los 3 escenarios presentados aunque en todos los escenarios se activaron las mismas regiones para la importación de energía, las regiones de control que

se activaron son: la región de control Oriental (2), la región de control Norte (5), la región de control Noreste (6) y la región de control Baja California (8).

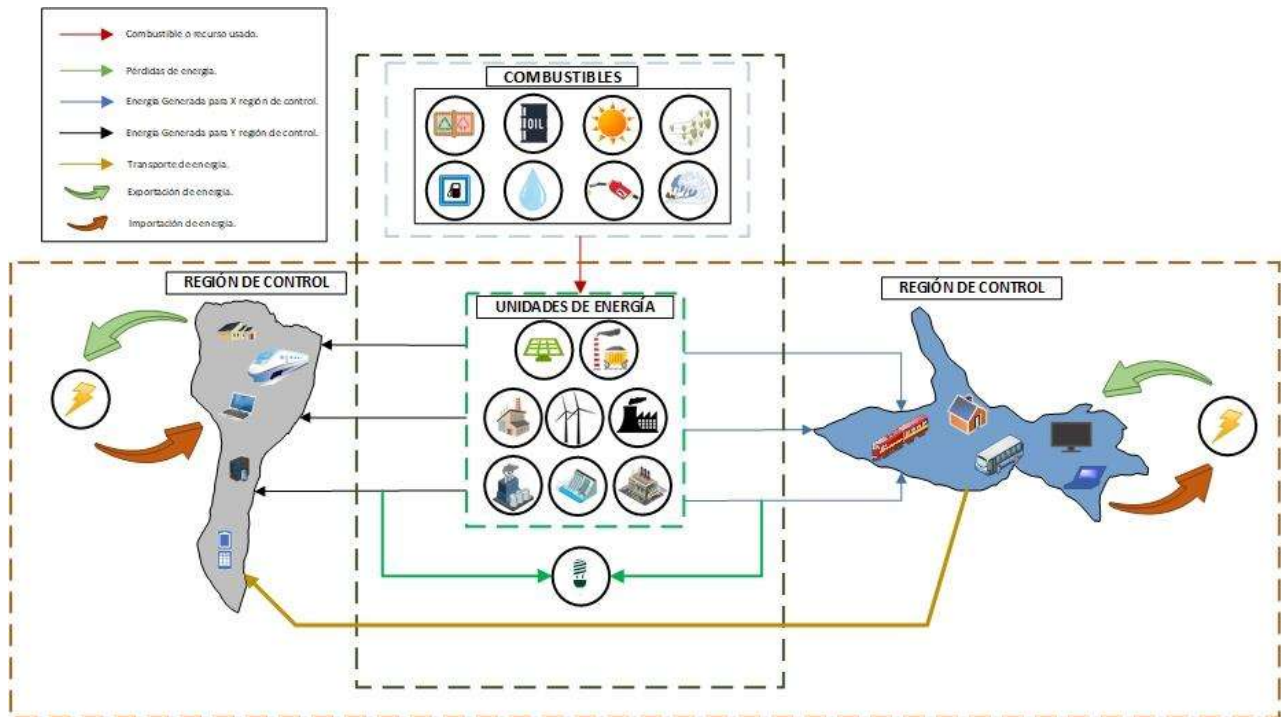


Figura 4.5 Interacción y representación entre dos regiones de control.

4.2 ENFOQUE MULTI-STAKEHOLDER

Se determinó usar el enfoque multi-stakeholder para obtener una solución multiobjetivo, este enfoque permitió analizar las diferentes soluciones factibles para una función objetivo, en esta función objetivo se encuentran los tres objetivos anteriormente analizados, cada objetivo individual se multiplica por un peso (W) asignado aleatoriamente que simbolizan una fracción del objetivo a satisfacer, la superficie de búsqueda de estas soluciones se puede observar en la **Figura 4.6**. Se realizaron diferentes casos para la optimización multiobjetivo, de los cuales se reportaron en la **Tabla 4.5**, en esta tabla se muestra los diferentes pesos (W) asignados aleatoriamente, la solución de los objetivos se muestra en dicha tabla.

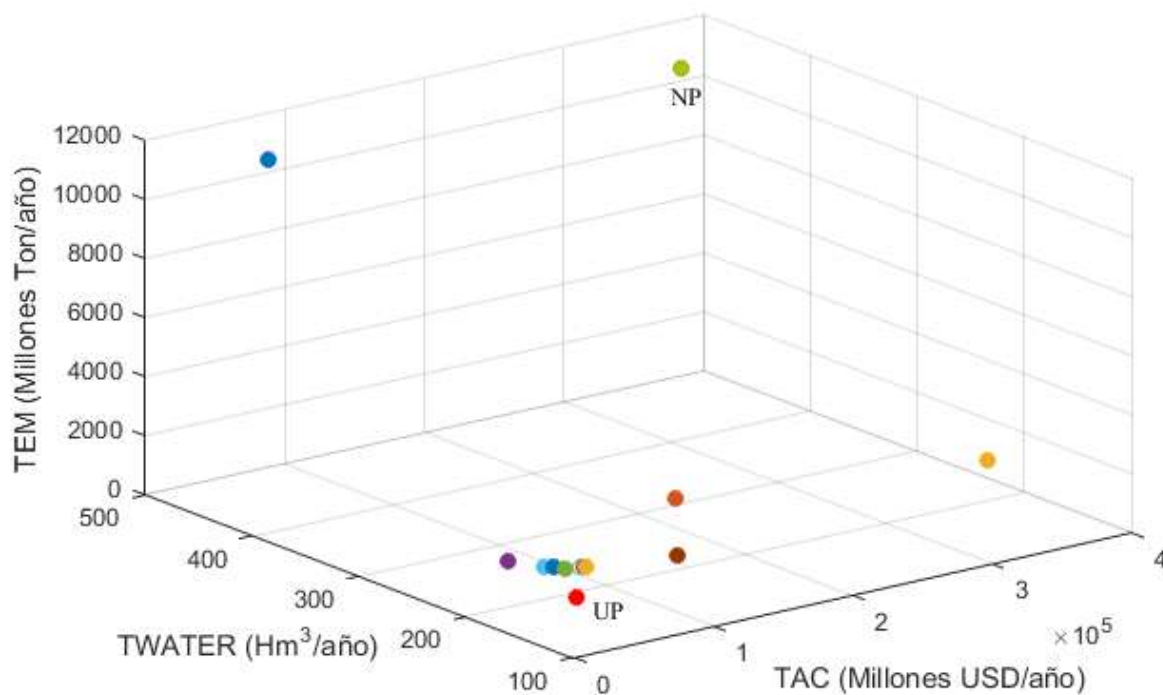


Figura 4.6 Representación gráfica de los resultados del modelo matemático multiobjetivo

Los resultados obtenidos en el enfoque multi-stakeholder se observa que los casos seleccionados para los tres objetivos principales que son el Costo Total Anual (TAC), Emisiones Totales de Gases de Efecto Invernadero (TEM), Consumo de Agua Total por Instalaciones de energía, se acercan al Punto Utópico (UP). Al analizar los resultados se notó la tendencia a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, esto comprende a los pesos (W) seleccionados, los cuales buscaron un balance entre los tres objetivos notando soluciones factibles favorables para cada uno de los objetivos por separado. El consumo de agua total se encontró un balance favorable con tendencia hacia el valor del Punto Utópico (UP), de la misma manera que para el Costo Total Anual que mostro valores con aproximación al UP, los valores de cada uno de los objetivos por separado se pueden observar en la **Tabla 4.5**, donde se analizaron 15 posibles combinaciones de pesos seleccionados aleatoriamente.

Tabla 4.5 Resultados del modelo matemático multiobjetivo.

CASO	PESOS SH			VARIABLES				OBJETIVOS		
	W1	W2	W3	OptCost (M USD/año)	Tcost (M USD/año)	CapCost (M USD/año)	GEi (GWh/año)	TAC (M USD/año)	TEM (M Ton/año)	TWATER (Hm ³ /año)
PUNTO UTÓPICO								69,572.10	85.36	188.55
PUNTO NADIR								364,705.00	10,958.87	475.45
MINIMIZANDO MSH										
1	1	0	0	64,121.00	15.00	0.00	265,682.60	69,572.10	10,958.87	475.45
2	0	1	0	224,002.00	26.00	3,013.00	267,639.21	232,166.00	85.36	306.68
3	0	0	1	354,414.00	39.00	4,817.00	269,012.80	364,705.00	1,637.31	188.55
4	0.5	0.3	0.3	85,606.00	35.00	196.00	268,606.42	91,273.00	88.16	245.82
6	0.2	0.4	0.4	103,251.00	37.00	692.00	268,446.17	109,415.00	88.17	232.05
7	0.4	0.2	0.4	89,046.00	35.00	325.00	268,548.45	94,841.00	88.16	241.89
8	0.1	0.3	0.6	157,561.00	36.00	1,654.00	268,246.43	164,687.00	88.01	217.97
12	10	5	20	102,800.00	37.00	662.00	268,457.48	108,934.00	97.33	229.97
13	30	15	10	76,363.00	24.00	196.00	267,657.71	82,019.00	86.97	268.83
14	20	5	30	92,901.00	35.00	493.00	268,381.83	98,865.00	97.19	236.25
15	40	20	30	101,394.00	37.00	692.00	268,368.15	107,558.00	88.03	233.19

CONCLUSIONES

En la actualidad ha aumentado el consumo de energía eléctrica mundialmente, y en consecuencia las emisiones de gases de efecto invernadero ya que la producción en su mayoría es a partir de combustibles fósiles, de igual manera existen tecnologías en las unidades generadoras de energía que consumen una gran cantidad de recurso hídrico, por lo que es crucial diseñar, planificar un sistema de energía eléctrica sustentable asegurando la satisfacción la demanda de energía.

Este proyecto propuso un enfoque de optimización con objetivos individuales, estos objetivos individuales fueron mencionados durante el documento los cuales son TAC, TEM y TWATER, con el fin de encontrar soluciones factibles para los escenarios propuestos, buscando minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de agua total y el costo total anual del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), el análisis de estos resultados nos darán las herramientas necesarias para diseñar, planificar un sistema de energía sustentable. En el sistema de generación, distribución, transferencia de energía las unidades consideradas fueron 178 ya existentes de 12 tecnologías diferentes las cuales son bioenergía, carboeléctrica, ciclo combinado, cogeneración eficiente, geotérmica, hidroeléctrica, combustión interna, energía nuclear, fotovoltaica, termoeléctrica, turbogás y energía eólica. Se consideró la implementación de nuevas unidades de generación de energía con diferente tipo de tecnologías que se pueden instalar en diferentes regiones de control de las 10 consideradas en este proyecto de acuerdo con su potencial de explotación de energía. También se consideraron pérdidas de energía, importación y exportación de energía. Estos factores, tecnologías y ecuaciones se modelaron a través de un modelo MIP para optimización y simulación, tomando en cuenta los objetivos individuales, uno de los objetivos de este proyecto de investigación es que el modelo matemático pueda ser reproducible en otra área que cumpla ciertas características para mejorar el sistema de energía.

Adicionalmente, se propuso otro enfoque de optimización multiobjetivo, en este caso se agregaron pesos aleatorios específicos (w) para cada uno de los objetivos individuales formando una función objetivo busque soluciones con objetivos que se

contraponen, se analizaron varios escenarios encontrando que con este enfoque los escenarios se aproximaban al Punto Utópico (UP).

Los resultados obtenidos en estos enfoques mostraron diferentes escenarios, notando que el sistema de energía nacional tiene poca dependencia de las importaciones de energía, la transmisión puede optimizarse teniendo en cuenta el potencial de fuentes de energía de las regiones de control para explotarlo y generar la energía extra para transmitirlos a otras regiones con menor potencial de explotación de fuentes de energía, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) puede retirar unidades de generación de energía con el objetivo de minimizar el Costo Total Anual (TAC) ya que los costos de operación y mantenimiento representan la mayor parte del TAC, siempre con la satisfacción de la demanda de energía.

El objetivo de la implementación de nuevas unidades de generación de energía es considerar la transición energética hacia un sistema energético sustentable, considerando la inversión en unidades de generación de energía con fuentes de energía renovables, en los escenarios donde se propuso como objetivo la minimización de emisiones de gases de efecto invernadero y la minimización del consumo de agua en el sistema energético, se favorece la inversión en unidades de generación de energía, tomando en cuenta que para 2024 el país se ha planteado el objetivo de producir el 35% de la energía a partir de fuentes de energía renovables, cumpliendo de igual manera con el objetivo del Acuerdo de París en respuesta a la amenaza del cambio climático.

La modernización del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) debe ser tomada en cuenta, debido al uso, desgaste y longevidad de ciertas unidades esenciales en el Sistema el mismo ha sufrido problemas de abastecimiento por fallas, es necesario realizar la actualización, modernización y mantenimiento adecuado para asegurar la satisfacción de los participantes en el sistema y los consumidores de energía.

Es importante considerar la implementación en futuros trabajos de sistemas con un enfoque de equilibrio para lograr la satisfacción de los integrantes del sistema energético, tomando como referencia enfoques como el equilibrio de Nash, y la teoría de justicia de Rawls. Así como la transición energética, teniendo en cuenta el potencial de explotación

de fuentes de energía renovables, desarrollar un modelo para un diseño adecuado del sistema energético y la planificación de la transición energética en el país que nos permita lograr objetivos ambientales, económicos y sociales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Türe, S., Uzun, D., Türe, E., 1997. The potential use of sweet sorghum as a nonpolluting source of energy. *Energy*, 22, 17-19. DOI: 10.1016/0360-5442(95)00024-0
- [2] Panwar, N. L., Kaushik, S. C., Kothari, S., 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1513–1524. DOI:10.1016/j.rser.2010.11.037
- [3] Bridgwater, A.V., 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass, *Chemical Engineering Journal*, 91, 87–102. DOI: 10.1016/s1385-8947(02)00142-0
- [4] European Commission, 1996. Energy for the future: Renewable sources of energy, *COM*, 96, 576. <Eur-lex.europa.eu>
- [5] Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J.F., Parra, R. 2014. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140–153. DOI:10.1016/j.rser.2014.01.004.
- [6] Enriquez, J., El-Halwagi, M. M., 2019. Advances in Carbon Management Technologies. *CRC Press. In press.*
- [7] Stuart, P.R., El-Halwagi, M. M., 2012. Integrated Biorefineries: Design, Analysis, and Optimization. *Green Chemistry and Chemical Engineering Series*, CRC Press, 4-15.
- [8] Zhang, F., Johnson, D.M., Sutherland, J.W., 2011. A GIS-based method for identifying the optimal location for a facility to convert forest biomass to biofuel. *Biomass and bioenergy*, 35, 3951-3961. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.06.006.

- [9] Rentizelas, A.A., Tolis, A.J., Tatsiopoulou, I.P., (2009). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 887–894. DOI: 10.1016/j.rser.2008.01.003.
- [10] Santibañez-Aguilar, J.E., González-Campos, J.B., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El Halwagi, M.M., (2011). Optimal Planning of a Biomass Conversion System Considering Economic and Environmental Aspects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 8558-8570. DOI: 10.1021/ie102195g.
- [11] Allen, J., Browne, M., Hunter, A., Boyd, J., Palmer, H., (1998). Logistics management and costs of biomass fuel supply. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 28, 463–477. DOI: 10.1108/09600039810245120.
- [12] You, F., Tao, L., Graziano, D. J., Snyder, S. W., 2011. Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis. *AIChE Journal*, 58, 1157–1180. DOI: 10.1002/aic.12637.
- [13] Awudu, I., Zhang, J. 2012. Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1359–1368. DOI: 10.1016/j.rser.2011.10.016.
- [14] Ren, J., Dong, L., Sun, L., Goodsite, M. E., Tan, S., Dong, L. 2015. Life cycle cost optimization of biofuel supply chains under uncertainties based on interval linear programming. *Bioresource Technology*, 187, 6–13. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.083.
- [15] Kim, J., Realf, M. J., Lee, J. H., 2011. Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 35, 1738–1751. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.02.008.

[16] El-Halwagi, A. M., Rosas, C., Ponce-Ortega, J. M., Jiménez-Gutiérrez, A., Mannan, M. S., El-Halwagi, M. M. 2013. Multiobjective optimization of biorefineries with economic and safety objectives. *AIChE Journal*, 59, 2427–2434. DOI: 10.1002/aic.14030.

[17] López-Díaz, D. C., Lira-Barragán, L. F., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M. 2017. Optimal location of biorefineries considering sustainable integration with the environment. *Renewable Energy*, 100, 65–77. DOI: 10.1016/j.renene.2016.05.028.

[18] El-Baz, A. A., Ewida, M. K. T., Shouman, M. A., El-Halwagi, M. M., 2004. Material flow analysis and integration of watersheds and drain systems: II. Integration and solution strategies with application to ammonium management in Bahr El-Baqar drain system. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7, 78–86. DOI: 10.1007/s10098-004-0259-6.

[19] Andres-Martinez, O., Fuentes-Cortes, L. F., Flores-Tlacuahuac, A. (2019). *Modeling national power flow systems through the energy hub approach. Industrial & Engineering Chemistry Research*. DOI:10.1021/acs.iecr.9b02469

[20] INECC, 2018. National Inventory of Greenhouse Gases. <gob.mx/inecc>

[21] An, H., Wilhelm, W. E., Searcy, S. W., 2011. Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: A literature review. *Biomass and Bioenergy*, 35, 3763-3774. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.06.021

[22] Islas, J., Manzini, F., Masera, O. 2007. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy*, 32, 2306–2320. DOI: 10.1016/j.energy.2007.07.012.

[23] SENER, 2014. Balance Nacional de Energía 2013. México.

[24] Yue, D., You, F., Snyder, S. W., 2014. Biomass to bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 36–56. DOI:10.1016/j.compchemeng.2013.11.01.

- [25] Yu, C.-H., Huang, C.-H., Tan, C.-S. (2012). *A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. Aerosol and Air Quality Research*, 12(5), 745–769. DOI:10.4209/aaqr.2012.05.0132
- [26] Kwon, S., Fan, M., Dacosta, H. F. M., Russell, A. G., Tsouris, C. (2011). Reaction kinetics of CO₂ carbonation with Mg-rich minerals. *The Journal of Physical Chemistry A*, 115(26), 7638–7644. DOI:10.1021/jp2040899
- [27] Ahmaruzzaman, M., 2010. Una revisión sobre la utilización de cenizas volantes. *Los avances en la ciencia y la combustión de Energía*, 36, 327-363.
- [28] Katsuyama, Y., Yamasaki, A., Iizuka, A., Fujii, M., Kumagai, K., Yanagisawa, Y., 2005. El desarrollo de un proceso para producir de alta pureza carbonato de calcio (CaCO₃) de cemento Residuos Uso de CO₂ presurizado. *El Progreso del Medio Ambiente*, 24, 162-170.
- [29] Dicho, A., Mattila, H.-P., Järvinen, M., Zevenhoven, R., 2013. La producción de carbonato de calcio precipitado (PCC) de fabricación de acero Escoria para la fijación de CO₂. *Energía Aplicada*, 112, 765-771.
- [30] Yu, S., Wei, Y.-M., Guo, H., Ding, L., 2014. *Carbon emission coefficient measurement of the coal-to-power energy chain in China. Applied Energy*, 114, 290–300. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.09.062
- [31] Giarola, S., Zamboni, A., Bezzo, F. 2011. Spatially explicit multi-objective optimisation for design and planning of hybrid first and second generation biorefineries. *Computers & Chemical Engineering*, 35, 1782–1797. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.01.020
- [32] Bernardi, A., Giarola, S., Bezzo, F., 2013. Spatially explicit multiobjective optimization for the strategic design of first and second generation biorefineries including carbon and water footprints. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 7170–7180. DOI: 10.1021/ie302442j.

[33] Redman, G., 2008. Assessment of on-farm AD in the UK. The Andersons Centre, National Non-Food Crops Centre.

[34] Grossmann, I. E., Guillén-Gosálbez, G., 2010. Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. *Computers & Chemical Engineering*, 34, 1365–1376. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.11.012.

[35] Huang, Y. (Eric), Fan, Y., Chen, C.-W., 2014. An integrated biofuel supply chain to cope with feedstock seasonality and uncertainty. *Transportation Science*, 48, 540–554. DOI: 10.1287/trsc.2013.0498.

[36] Shabani, N., Sowlati, T., Ouhimmou, M., Rönnqvist, M., 2014. Tactical supply chain planning for a forest biomass power plant under supply uncertainty. *Energy*, 78, 346–355. DOI: 10.1016/j.energy.2014.10.019.

[37] Kesselman, A., Leonardi, S., 2012. Game-theoretic analysis of Internet switching with selfish users. *Theoretical Computer Science*, 452, 107–116. DOI:10.1016/j.tcs.2012.05.029.

[38] Cachon, G. P., Netessine, S., 2006. Game theory in supply chain analysis. *models, methods, and applications for innovative decision making*, 200–233. DOI: 10.1287/educ.1063.0023.

[39] Bai, Y., Ouyang, Y., Pang, J.-S., 2012. Biofuel supply chain design under competitive agricultural land use and feedstock market equilibrium. *Energy Economics*, 34, 1623–1633. DOI: 10.1016/j.eneco.2012.01.003.

[40] Santamarta, J., 2004. The renewable energies they are the future. *World Watch*. 34-40.

[41] Sánchez-Bautista, A. de F., Santibañez-Aguilar, J. E., Fuentes-Cortés, L. F., Flores-Tlacuahuac, A., Ponce-Ortega, J. M., 2018. A Multistakeholder Approach for

the Optimal Planning of Sustainable Energy Systems. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6, 9451–9460. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b01937

[42] Cucchiella, F., D'Adamo, I. (2013). *Issue on supply chain of renewable energy. Energy Conversion and Management*, 76, 774–780. DOI:10.1016/j.enconman.2013.07.081

[43] Draimin, T., Krauze, E., Heifetz, H., 1998. *Mexico: Biography of Power: A History of Modern Mexico, 1810-1996. International Journal*, 53(2), 366. DOI:10.2307/40203308.

[44] Jonathan Ho, Wesley Cole, Evangelia Spyrou. ReEDS-Mexico: A Capacity Expansion Model of the Mexican Power System. National Renewable Energy Laboratory. September 2017.

[45] Al-Douri, A., Sengupta, D., El-Halwagi, M. M., 2017. *Shale gas monetization – A review of downstream processing to chemicals and fuels. Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45, 436–455. DOI:10.1016/j.jngse.2017.05.016.

[46] Bielicki, J. M., Pollak, M. F., Deng, H., Wilson, E. J., Fitts, J. P., Peters, C. A., 2016. *The leakage risk monetization model for geologic CO₂ Storage. Environmental Science & Technology*, 50(10), 4923–4931. DOI:10.1021/acs.est.5b05329.

[47] He, Z., Li, Y., Zhang, W., Ma, X., Duan, L., Song, H., 2017. *Effect of re-carbonation on CO₂ capture by carbide slag and energy consumption in the calciner. Energy Conversion and Management*, 148, 1468–1477. DOI:10.1016/j.enconman.2017.07.006.

[48] Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., Gorini, R., 2019. *The role of renewable energy in the global energy transformation. Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50. DOI:10.1016/j.esr.2019.01.006

[49] INEGI, 2018. Indicator of the State Economic Activity. GDP and national accounts, Mexico. <inegi.org.mx/temas/itae/>

- [50] Sánchez-Bautista, A. de F., Santibañez-Aguilar, J. E., Fuentes-Cortés, L. F., Flores-Tlacuahuac, A., Ponce-Ortega, J. M., 2018. *A multistakeholder approach for the optimal planning of sustainable energy systems. ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(7), 9451–9460. DOI:10.1021/acssuschemeng.8b01937
- [51] González-Bravo, R., Mahlkecht, J., Ponce-Ortega, J. M., 2018. Water, food and power grid optimization at macroscopic level involving multi-stakeholder approach. *Energy Procedia*, 153, 347–352. DOI:10.1016/j.egypro.2018.10.013
- [52] González-Bravo, R., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M., 2016. Multiobjective optimization of dual-purpose power plants and water distribution networks. *ACS Sustain Chem Eng.* 4:6852–6866. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01817>
- [53] SAGARPA-SIAP, 2018. Mexican System of Information about Agriculture and Fishing. Statistical Yearbook of Agricultural Production, Mexico. <nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- [54] SENER, Secretary of Energy. Development Program of the National Electric System. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf> (accessed Dec 28, 2020).
- [55] Water Footprint Network. Water Scarcity. <https://waterfootprint.org/en/about-us/news/news/water-scarcity-whatdoes-it-mean-sustainable-devel/> (accessed Jan 5, 2021)
- [56] SENER, Secretary of Energy. Energy Information System (SIE), 2019. <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions> (accessed Dec 12, 2020).
- [57] SENER, Secretary of Energy. Energy Balance, 2017. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf (accessed Dec 2020).

[58] Stevens, L., Anderson, B., Cowan, C., Johnson, D., THE FOOTPRINT OF ENERGY: LAND USE OF U.S. ELECTRICITY PRODUCTION, Strata Policy, June 2017.

[59] CENACE (2019). National energy balance 2019. National center for energy control. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/consumo-mensual-bruto-del-sistema-electrico-nacional>. Accessed Nov 2020.

[60] CFE (2018) Electricity user and consumption by municipality 2018. Federal electricity commission. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/usuarios-y-consumo-de-electricidad-por-municipio-apartir-de-2018>. Accessed April 2020. Accessed Dec 2020.

[61] BENLESA, Seisa Energy. Bioenergy of N.L., S.A. de C.V.,
<https://www.seisaenergia.com/>.

APÉNDICE A. PUBLICACIONES



Water, energy, and food security assessment in regions with semiarid climates

Katè Geraldine Sánchez-Zarco¹ · Edgar Geovanni Mora-Jacobo¹ · Ramón González-Bravo² · Jürgen Mahlknecht² · José María Ponce-Ortega¹

Received: 20 May 2020 / Accepted: 10 October 2020
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020

Abstract

The availability, accessibility, and sustainability of resources can enhance or jeopardize the security of meeting human needs for water, energy, and food in several regions of the world. For this reason, it is crucial to propose strategies that allow quantifying the current situation of resource security and preventing alarming scenarios in the future. The objective of this paper is to assess the current condition of food, energy, and water security of a region with rampant economic development, but struggling with natural resources as a result of its adverse climatic conditions. An approach for assessing the water–energy–food security in arid or semiarid areas is presented through different scenarios considering the availability, accessibility, and sustainability of the involved resources. The proposed approach is applied in the State of Nuevo León in Mexico, which is the second-most important state regarding contribution to the national Gross Domestic Product. Nevertheless, the rapid increase in its population and the semiarid climate condition with precedents of natural catastrophes jeopardize the continuity of its development. Results show that the state may not be able to meet the demands of water and food due to the stress generated on its resources. In contrast, the energy situation is more promising with the implementation of energy from renewable sources. The analysis is carried out over a past time period and making projections until 2030, providing a tool to be able to make decisions in the medium and long term. The main goal is to propose preventive measures and to ensure sustainable planning covering economic, social, and environmental needs without compromising the well-being of future generations. In this sense, the implementation of new policies for the water sector is analyzed, with the aim of reducing domestic and agricultural consumption, targeting improvements in the evaluated indices.

✉ José María Ponce-Ortega
jmponce@umich.mx

¹ Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco I. Mujica S/N, Ciudad Universitaria, 58060 Morelia, Michoacán, México

² Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada Sur No. 2501, 64849 Monterrey, Nuevo León, México

Systematic Approach for Assessing the Water–Energy–Food Nexus for Sustainable Development in Regions with Resource Scarcities

Brenda Cansino-Loeza, Xate Geraldine Sánchez-Zarco, Edgar Geovanni Mora-Jacobo, Frida Elizabeth Saggiante-Mauro, Ramón González-Bravo, Jürgen Mahlknecht, and José Maria Ponce-Ortega*

Cite This: <https://dx.doi.org/10.1021/acscschemeng.0c04331>

Read Online

ACCESS |

Metrics & More

Article Recommendations

ABSTRACT: Currently, the security of basic resources such as water, energy, and food is regarded as essential for sustainable development. Nonetheless, population growth, economic development, and changing consumption patterns have caused stress on these resources. It is expected that, in the near future, in many parts of the world, it will be challenging to satisfy the demand of the population and the access to essential services. Assessing the availability and access to natural resources allows for making projections of future scenarios and, in this sense, developing policies to mitigate deficiencies in all these sectors. This work presents an approach to assess the progress on the water–energy–food nexus security through an index that involves availability, accessibility, and sustainability indicators of a region over a time period. The evaluation considering the Sustainable Development Goals allows for identifying vulnerabilities associated with the water–energy–food nexus. The state of Sonora in Mexico was selected as a case study because of its unequal distribution and accessibility of resources. Results show that water, energy, and food access is not at risk, but the importation of resources to meet the demand of the state makes the nexus unsustainable because the availability of resources is not enough to satisfy the services of the population. Nevertheless, projections for 2030 show slight improvements in the water–energy–food nexus security.

KEYWORDS: Energy security, Food security, Water security, Resource depletion, Sustainability indicators, Sustainable Development Goals



INTRODUCTION

The water–energy–food (WEF) nexus has become a focus of study for the decision-making analysis toward sustainable development. The nexus thinking was first introduced in the Bonn Conference,¹ where special attention was given to the sustainable integration and management of water, energy, and food, including their interlinkages. It was not until the Bonn Conference that the WEF nexus gained global attention, as well as the interest in recognizing the consequences of external impacts in the three sectors simultaneously. Rapid urbanization, exponential population growth, and changing diets have been the main drivers of the alteration in demand patterns that have considerably increased in the last few decades.² Nonetheless, climate change is an essential fact that must be considered in the decision-making process because it is possible that resource security will never be achieved entirely with the increasing demands.³ By 2050, an increase in water demand of 55% is estimated.⁴ Furthermore, it is expected that almost 57% of the global population will suffer water scarcity,⁵ energy consumption will augment up to 50%,⁶ and the food demand will increase up to 60%.⁷ Therefore, the assessment of

the WEF nexus is crucial because the interaction between these sectors makes it more challenging to face the increasing demands, and consequently, this could lead to further resource scarcity.

Water, energy, and food are inextricably interrelated, and they are essential for the subsistence of human beings.⁸ Water is necessary for fossil fuels, electricity production, and agriculture. Energy is required for water treatment and its distribution and for food storage and production; on the contrary, food production can contribute to fuel stocks.⁹ Any change in the availability of these resources has strong effects on human health and quality of life (Figure 1). The nexus thinking is an integral tool for the understanding of water,

Received: June 11, 2020

Revised: August 17, 2020

Published: August 20, 2020