



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE MANERA SOSTENIBLE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

TANIA ITZEL SERRANO ARÉVALO



ASESOR:
DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

MORELIA MICH.

DICIEMBRE 2019

A mis padres, Martha y Raúl... Con todo mi cariño.

Era como un nuevo mundo abierto para mí, el mundo de la ciencia, que por fin se me permitió conocer en toda libertad.

Marie Curie.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente doy gracias a mi Dios por darme de la oportunidad de vivir y permitirme llegar hasta donde jamás imaginé.

A ustedes mis padres, Martha Arévalo y Raúl Serrano, por haberme forjado para ser la persona que soy, por sus enseñanzas y valores que desde pequeña me transmitieron, la manera de apoyarme, por estar en los mejores momentos y levantarme en los momentos difíciles, por esa manera tan noble que tienen de ser, porque este logro es por y para ustedes, por lo que sin su esfuerzo nunca hubiera sido posible, se lo debo al esfuerzo que hicieron para lograr mis sueños. Por esto y mucho más, estaré toda mi vida agradecida y orgullosa, los amo y doy gracias a Dios por tenerlos en este momento que me hace tan feliz.

A mis amados hermanos, te doy las gracias Karla por el gran ejemplo que eres, por esa sencillez y humildad que te caracteriza y por apoyarme cuando más te he necesitado. A ti Kevin, por ser la alegría que ilumina mi vida y por sacarme una sonrisa en todo momento.

A mi asesor, José María Ponce, gracias por creer en mí desde el primer momento, por depositar su confianza y ver cualidades que me han ayudado a ser mejor persona y estudiante. Por despertar en mí el interés de la investigación y por permitirme aprender de su conocimiento y capacidad. Por estar al tanto de mis estudios y por su valioso tiempo en este trabajo de investigación. Por esto y mucho más, estaré eternamente agradecida.

A usted Agustín Castro Montoya por su apoyo durante este proceso, por esa manera tan peculiar y humilde de enseñar, por sus enseñanzas de vida. Gracias, profesora Carmen Chávez Parga por su disponibilidad de ayudarme y sus sabias observaciones.

Mauro Serrano y Martha Martínez, gracias tíos por su apoyo incondicional, porque desde que tengo memoria se han preocupado por mi educación. Por sus sabios consejos y por el interés que han mostrado, por creer en mis capacidades y hacerme saber que me apoyarán en todo momento, los quiero y estimo demasiado.

A Héctor Serrano, por preocuparte por mí, sin importar la distancia y el tiempo, por estar tan orgulloso de mis logros, gracias tío por tu apoyo, por siempre preocuparte por mí en todos los aspectos.

Pablo Chávez, Lucy Pelayo y Pedro García, gracias amigos por enseñarme tanto, por su apoyo incondicional en estos últimos cinco años, porque logre encontrar en ustedes una amistad que no imaginé.

A todos mis compañeros y amigos: América Mondragón, Alejandro Calderón, Daniel Portillo, Juan Montero, Brenda Trujillo, Ulises Salazar, Lluvia Martínez. Por compartir grandes momentos de felicidad, así como largas horas de estudio que fueron inigualables.

Finalmente, gracias a cada una de las personas que estuvieron presentes durante este gran proceso, que el día de hoy me hace sin duda mejor persona.

.

RESUMEN

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE MANERA SOSTENIBLE

Por

Tania Itzel Serrano Arévalo

Diciembre del 2019

Licenciatura en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega

En el presente proyecto de Tesis se propone desarrollar modelos de programación matemática que permitan analizar y optimizar el comportamiento de la obtención de energía eléctrica para la satisfacción de la demanda energética a partir de distintos tipos de tecnologías que se dividen en convencionales y limpias, las cuales son las siguientes: ciclo combinado, termoeléctrica convencional, carboeléctrica, turbogás, combustión interna, hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar fotovoltaica y termosolar. Asimismo, se busca realizar una predicción a futuro acerca de la cantidad de potencia energética requerida en el periodo 2020-2030, la cual busca encontrar la solución óptima reduciendo el costo anual total para dicha planeación, relacionando plantas existentes, así como plantas nuevas que serán requeridas en cada periodo de tiempo para satisfacer la potencia de demanda. Tradicionalmente, para satisfacer la demanda energética solamente se contemplan aspectos económicos sin dar importancia a cuestiones ambientales, esto ha generado problemas en el medio ambiente significativos, por lo que en este proyecto se contempla minimizar el consumo de agua y las emisiones de gases productores de contaminación como son CO_2 , NO_x , SO_2 y emisiones de partículas. Particularmente, el interés se centra en la producción de energía eléctrica a partir de las tecnologías antes mencionadas, como caso de estudio se propone abordar el caso específico a nivel nacional de México y su contexto global para el futuro realizando distintas planeaciones de demanda energética.

Palabras Clave: Optimización, energía eléctrica, demanda energética, tecnologías, centrales eléctricas.

ABSTRACT

STRATEGIC PLANNING FOR THE SUSTAINABLE GENERATION OF ELECTRICITY

by

Tania Itzel Serrano Arévalo

December 2019

Bachelor in Chemical Engineering

Directed by: Dr. José María Ponce Ortega

In the present research project it is proposed to develop mathematical programming models that allow analyzing and optimizing the behavior of obtaining electric energy for satisfying the energy demand from different types of technologies that are divided into conventional and clean, which are the following: combined cycle, conventional thermoelectric, coal, turbogas, internal combustion, hydroelectric, wind, geothermal, solar photovoltaic and solar thermal. It also seeks to make a future prediction about the amount of electric power required in the period 2020-2030, which seeks to find the optimal solution by reducing the total annual cost for such planning, relating existing plants, as well as new plants that will be required in each period of time to satisfy the demanded power. Traditionally, to meet energy demand only economic aspects are considered without giving importance to environmental issues, this has generated significant problems in the environment so this project includes minimizing water consumption and emissions of pollution-producing gases such as CO₂, NO_x, SO₂ and particle emissions. In particular, the interest is focused in the production of electric energy from the aforementioned technologies, as a case study it is proposed to address the specific case at the national level of Mexico and its global context for the future by carrying out different energy demand planning.

Keywords: Optimization, electric power, energy demand, technologies, power plants.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE GENERAL	VII
GLOSARIO	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
NOMENCLATURA	XIII
1. PRESENTACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES	3
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos particulares</i>	5
1.5. HIPÓTESIS.....	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. INTRODUCCIÓN.....	7
2.2. ENERGÍA ELÉCTRICA	7
2.3. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES	8
2.4. CICLO COMBINADO	9
2.5. TERMOELÉCTRICA CONVENCIONAL.....	10
2.6. TURBOGÁS	11
2.7. COMBUSTIÓN INTERNA.....	12
2.8. CARBOELÉCTRICA.....	12
2.9. TECNOLOGÍAS LIMPIAS.....	12
2.10. HIDROELÉCTRICAS.....	13

2.11. EÓLICA.....	14
2.12. GEOTÉRMICA.....	14
2.13. SOLAR FOTOVOLTAICA.....	14
2.14. TERMOSOLAR	15
2.15. OPTIMIZACIÓN.....	15
3. METODOLOGÍA.....	16
3.1. INTRODUCCIÓN.....	16
3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
3.3. FORMULACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTA.....	16
3.4. MODELO MATEMÁTICO	18
3.4.1. <i>Plantas de energía existentes</i>	18
3.4.2. <i>Plantas nuevas</i>	19
3.4.3. <i>Demanda</i>	21
3.4.4. <i>Energía limpia</i>	22
3.4.5. <i>Emisiones contaminantes</i>	22
3.4.6. <i>Agua</i>	23
3.4.7. <i>Costo anual total</i>	24
3.4.8. <i>Función objetivo</i>	24
3.5. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	25
3.5.1. <i>Escenario A</i>	25
3.5.2. <i>Escenario B</i>	25
3.5.3. <i>Escenario C</i>	25
3.5.4. <i>Escenario D</i>	26
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
4.1. INTRODUCCIÓN.....	28
4.2. DEMANDA	28
4.3. ASPECTOS ECONÓMICOS.....	29
4.4. ASPECTOS AMBIENTALES	31
4.5. MINIMIZACIÓN DE EMISIONES.....	33
4.6. LÍMITES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE EMISIONES	47

4.7. CONSUMO DE AGUA	48
4.8. MINIMIZACIÓN DE CONSUMO DE AGUA	49
4.9. LÍMITES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE CONSUMO DE AGUA	53
4.10. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS	53
5. CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXOS.....	57
CÓDIGO GAMS®.....	57

GLOSARIO

Capacidad: Medida de la aptitud de un generador, línea de transmisión, banco de transformación, de baterías, o capacitores para generar, transmitir o transformar la potencia eléctrica en un circuito.

Central generadora: Lugar y conjunto de instalaciones utilizadas para la producción de energía eléctrica. Dependiendo del medio utilizado para producir dicha energía, recibe el nombre correspondiente.

Consumo de energía: Potencia eléctrica utilizada por toda o por una parte de una instalación de utilización durante un período determinado de tiempo.

Demanda eléctrica: Requerimiento instantáneo a un sistema eléctrico de potencia.

Energía: La energía es la capacidad de los cuerpos o conjunto de éstos para efectuar un trabajo.

Giga Watt: Múltiplo de la potencia activa, que equivale a mil millones de watts y cuyo símbolo es GW.

Potencia eléctrica: Tasa de producción, transmisión o utilización de energía eléctrica.

Producción de una central: Energía eléctrica efectivamente generada por una central durante un período determinado.

Emisiones: emisiones de bióxido de carbono (CO_2), bióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas sólidas, por el uso de combustibles fósiles en las unidades generadoras.

Costo de inversión: costo asociado al desarrollo de un proyecto de generación, el cual incluye los conceptos de ingeniería, suministro y construcción de la unidad generadora, más los conceptos de estudios, diseño, permisos, y otras actividades relacionadas con la obra.

TAC: Costo anual total.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de tecnologías.....	7
Figura 2. Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología SENER.....	8
Figura 3. Generación de energía a partir de combustibles fósiles.....	9
Figura 4. Diagrama de central de ciclo combinado.....	10
Figura 5. Ciclo de la turbina de gas.....	11
Figura 6. Energías limpias	13
Figura 7. Demanda energética vs tiempo	29
Figura 8. Costo anual total para solución de escenarios.....	30
Figura 9. Emisiones emitidas por clasificación para la solución de los casos de estudio	32
Figura 10. Emisiones emitidas totales para la solución de los casos de estudio	33
Figura 11. Diagrama de Pareto de bióxido de carbono escenario A	35
Figura 12. Diagrama de Pareto de óxidos de nitrógeno escenario A	36
Figura 13. Diagrama de Pareto de dióxido de azufre escenario A.....	37
Figura 14. Diagrama de Pareto de partículas escenario A.....	38
Figura 15. Diagrama de Pareto de bióxido de carbono escenario B	39
Figura 16. Diagrama de Pareto de óxidos de nitrógeno escenario B	40
Figura 17. Diagrama de Pareto de dióxido de azufre escenario B	41
Figura 18. Diagrama de Pareto de partículas escenario B.....	42
Figura 19. Diagrama de Pareto de bióxido de carbono escenario C	43
Figura 20. Diagrama de Pareto de óxidos de nitrógeno escenario C	44
Figura 21. Diagrama de Pareto de dióxido de azufre escenario C	45
Figura 22. Diagrama de Pareto de partículas escenario C	46
Figura 23. Consumo de agua para solución de escenarios	49
Figura 24. Diagrama de Pareto de consumo de agua escenario A	50
Figura 25. Diagrama de Pareto de consumo de agua escenario B	51
Figura 26. Diagrama de Pareto de consumo de agua escenario C	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Demanda energética de escenarios	26
Tabla 2. Costo anual total	29
Tabla 3. Instalación de plantas nuevas por tipo de tecnología.....	31
Tabla 4. Emisiones	32
Tabla 5. Emisiones totales	33
Tabla 6. Emisiones máximas y mínimas de bióxido de carbono escenario A.....	35
Tabla 7. Emisiones máximas y mínimas de óxidos de nitrógeno escenario A.....	36
Tabla 8. Emisiones máximas y mínimas de dióxido de azufre escenario A.....	37
Tabla 9. Emisiones máximas y mínimas de partículas escenario A.....	38
Tabla 10. Emisiones máximas y mínimas de bióxido de carbono escenario B	39
Tabla 11. Emisiones máximas y mínimas de óxidos de nitrógeno escenario B	40
Tabla 12. Emisiones máximas y mínimas de dióxido de azufre escenario B.....	41
Tabla 13. Emisiones máximas y mínimas de partículas escenario B.....	42
Tabla 14. Emisiones máximas y mínimas de bióxido de carbono escenario C	43
Tabla 15. Emisiones máximas y mínimas de óxidos de nitrógeno escenario C	44
Tabla 16. Emisiones máximas y mínimas de dióxido de azufre escenario C.....	45
Tabla 17. Emisiones máximas y mínimas de partículas escenario C.....	46
Tabla 18. Emisiones no generadas escenario A.....	47
Tabla 19. Emisiones no generadas escenario B	47
Tabla 20. Emisiones no generadas escenario C	47
Tabla 21. Consumo de agua.....	48
Tabla 22. Consumo de agua máximo y mínimo escenario A	50
Tabla 23. Consumo de agua máximo y mínimo escenario B	51
Tabla 24. Consumo de agua máximo y mínimo escenario C	52
Tabla 25. Agua no consumida.....	53

NOMENCLATURA

e	Plantas existentes
n	Plantas nuevas
ec	Plantas existentes limpias
enc	Plantas existentes convencionales
nc	Plantas nuevas limpias
nnc	Plantas nuevas convencionales
t	Periodo
$y_{n,t}^{new}$	Variable binaria
$P_{enc,t}^{exist}$	Energía producida en plantas existentes convencionales en el período t
$P_{e,t}^{exist}$	Energía producida en plantas existentes en el periodo t
$f_{enc,t}^{exist}$	Combustible usado en plantas existentes convencionales en periodo t
$C_{O\&M}^{exist}$	Costo de operación y mantenimiento en plantas existentes
$P_{n,t}^{new}$	Energía producida en plantas nuevas en periodo t
$P_{nnc,t}^{new}$	Energía producida en plantas nuevas convencionales en periodo t
$f_{nnc,t}^{new}$	Combustible usado en plantas nuevas convencionales en periodo t
Cap_n^{nc}	Capacidad instalada en plantas nuevas
$C_{O\&M}^{new}$	Costo de operación y mantenimiento en plantas nuevas

$C_{inv,n}^{new}$	Costo de inversión en plantas nuevas
$P_{ec,t}^{exist}$	Energía producida en plantas existentes limpias en el período t
$P_{nc,t}^{new}$	Energía producida en plantas nuevas limpias en el período t
$Emissco_2$	Emisiones producidas de bióxido de carbono en plantas nuevas y existentes convencionales
$Emissno_x$	Emisiones producidas de óxidos de nitrógeno en plantas nuevas y existentes convencionales
$Emissso_2$	Emisiones producidas de dióxido de azufre en plantas nuevas y existentes convencionales
$Emisspart$	Emisiones producidas de partículas en plantas nuevas y existentes convencionales
$Water$	Consumo de agua en plantas nuevas
TAC	Costo anual total
$\alpha_{enc,t}^{exist}$	Eficiencia de plantas existentes convencionales en periodo t
$Cap_{e,t}^{exist}$	Capacidad instalada en plantas existentes en periodo t
$\beta_{e,t}^{exist}$	Costo por unidad de energía en plantas existentes en el periodo t
r	Tasa de interés
t	Años
P_n^{max}	Energía máxima producida en plantas nuevas
$\alpha_{nnc,t}^{new}$	Eficiencia de plantas nuevas convencionales en periodo t
ω^{cap}	Potencia producida en plantas nuevas en periodo t
$\beta_{n,t}^{new}$	Costo por unidad de energía en plantas nuevas en el periodo t

γ_n^{new}	Costo por unidad de energía en plantas nuevas en el periodo t
$\omega^{cos inv}$	Costo de inversión en plantas nuevas
P_t^{demand}	Demanda de energía en periodo t
P_t^{clean}	Energía limpia en periodo t
$\phi_{enc,t}^{emiss-existco_2}$	Factor de emisión para plantas existentes convencionales de bióxido de carbono en periodo t
$\phi_{nnc,t}^{emiss-newco_2}$	Factor de emisión para plantas nuevas convencionales de bióxido de carbono en periodo t
$\phi_{enc,t}^{emiss-existNO_x}$	Factor de emisión para plantas existentes convencionales de óxidos de nitrógeno en periodo t
$\phi_{nnc,t}^{emiss-newNO_x}$	Factor de emisión para plantas nuevas convencionales de óxidos de nitrógeno en periodo t
$\phi_{enc,t}^{emiss-existSO_2}$	Factor de emisión para plantas existentes convencionales de óxidos de azufre en periodo t
$\phi_{nnc,t}^{emiss-newSO_2}$	Factor de emisión para plantas nuevas convencionales de óxidos de azufre en periodo t
$\phi_{enc,t}^{emiss-existpart}$	Factor de emisión para plantas existentes convencionales de partículas en periodo t
$\phi_{nnc,t}^{emiss-newpart}$	Factor de emisión para plantas nuevas convencionales de partículas en periodo t
$\delta_{e,t}^{water-exist}$	Factor de consumo de agua en plantas existentes en periodo t
$\delta_{n,t}^{water-new}$	Factor de consumo de agua en plantas nuevas en periodo t

CAPÍTULO I

1. PRESENTACIÓN

1.1. Introducción

En la actualidad el consumo de energía eléctrica es una necesidad indispensable. La energía eléctrica es un insumo primario para la realización de las actividades productivas, de transformación y servicios en el país, como son el abastecimiento de alimentos, comunicaciones, transporte, casas habitación, industrias, entre otras. Es un bien final indispensable para los consumidores. Garantizar el abasto de electricidad, de forma continua y segura, permite el acceso a bienes y servicios básicos, como la alimentación, salud y educación, lo cual incide directamente en el bienestar y calidad de vida de la población. El suministro eficiente de energía eléctrica a un costo accesible promueve la competitividad y la capacidad de las empresas e industria para ofrecer más y mejores productos y servicios en el mercado, lo que tiene un impacto directo en el crecimiento económico. La suma de estas condiciones converge en un mayor progreso del país, que hacen del sector eléctrico un promotor directo del desarrollo económico y social. Con la finalidad de conocer el impacto de la industria eléctrica en la estructura productiva del país se identificaron los usos de la energía eléctrica en los procesos productivos del total de la producción de la industria eléctrica, el 62.2% se destina a las actividades secundarias, mientras que las actividades terciarias y primarias consumen 35.6% y 2.2%, respectivamente [1].

A medida que los países se industrializan, se consumen cantidades de energía cada vez más grandes, por lo que el consumo de energía ha aumentado muy rápidamente en los últimos años, y México no es la excepción. Según los estudios realizados, el promedio del consumo de electricidad por habitante es alrededor de diez veces mayor en los países industrializados que en el mundo en desarrollo, por lo que podemos decir que el consumo de energía eléctrica está ligado directamente al desempeño de la economía de un país.

Uno de los principales problemas en México es la producción de energía eléctrica, la cual se encuentra cada vez en mayor demanda, es por esta razón que se debe implementar una solución apropiada para abastecer la demanda y al mismo tiempo considerar el tipo de tecnología para su producción, costos e impacto ambiental en general.

CAPÍTULO I

México a nivel mundial se ubica en el lugar 51 de 137 economías, de acuerdo con el índice de competitividad global. En materia de obtención de electricidad, México se encuentra en el sitio 92 de 190 economías, según reporta Doing Business (2018), publicado por el banco mundial, lo cual indica una mejora que permitió que México superará a Argentina en el ranking, no obstante, no se ha logrado superar a países como Colombia, Perú, Uruguay y Brasil, los dos últimos se encuentran entre los primeros 50 países con mayor competitividad en obtención de electricidad según reporta el banco mundial. En materia de energías limpias, México ocupa la posición 4 de 71 economías con mayor atractivo para inversiones en Energías Limpias, sólo detrás de China, Jordania y Brasil, según Bloomberg New Energy Finance (2018) [1].

La forma de obtención de energía eléctrica se encuentra mayormente relacionada con energías convencionales, cabe mencionar que algunas utilizan combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural) considerados recursos naturales no renovables cuyas reservas se están agotando debido a la explotación incontrolada de dichas fuentes, además de que producen emisiones contaminantes para el medio ambiente. Sin embargo, no se ha otorgado la importancia suficiente a lo antes mencionado y se siguen utilizando las energías no renovables, por lo que en este proyecto de investigación se pretende encontrar una solución óptima estableciendo un balance entre costos y el impacto ambiental.

Para satisfacer la demanda energética, también se utilizan tecnologías limpias como son: hidroeléctricas, eólicas, geotérmicas, solar fotovoltaica y termosolar, por mencionar las que más impacto tienen, a pesar de ello las energías limpias no son las más utilizadas para la producción a nivel general, por lo que se pretende utilizarlas a mayor escala en un futuro. Por ello, se realizará una predicción para abastecer la demanda energética de manera tal que sea de manera sustentable. Para ello, es necesario analizar el efecto de la contaminación que se genera al producir energía, a fin de mitigar el cambio climático, sin descuidar el abasto de energía, esto para no frenar el desarrollo nacional. Adicionalmente a esto, se propone abordar el caso específico de México y su contexto global para el futuro realizando distintas proyecciones de demanda energética.

1.2. Antecedentes

Una de las problemáticas más importantes en el país es la generación de energía eléctrica, ya que la demanda que se presenta en el país va en aumento, debido a esto, anteriormente se han realizado investigación que se deben tener en consideración ya que se relacionan con la energía eléctrica en general. En este sentido, Ramos-Gutiérrez *et al.* (2012) realizaron una investigación sobre la generación de energía eléctrica para dar a conocer el parque eléctrico nacional que tiene México, como ha crecido en centrales, potencia y generación a través del tiempo [5]. Por otro lado, González-Bravo *et al.* (2018) presentaron un enfoque para evaluar las redes de distribución de agua y energía para la producción de alimentos, con el fin de apoyar la toma de decisiones y guiar el desarrollo sostenible, el modelo de optimización propuesto buscó identificar la solución óptima, incluidos los aspectos económicos, ambientales y sociales [6].

Por otro lado, considerando el impacto ambiental se han desarrollado investigaciones acerca de la contaminación producida al generar energía eléctrica. En este contexto, Martínez-Guido *et al.* (2019) presentaron un enfoque de optimización para la planificación estratégica para el uso de la biomasa de residuos de pellets en centrales eléctricas para la producción de energía eléctrica. El enfoque propone todas las actividades incluidas en la cadena de suministro desde la recolección de residuos hasta la combustión de pellets en las centrales eléctricas. En particular, se supuso la ubicación y el diseño de las plantas de granulación en una región macroscópica, así como la selección de la biomasa y las rutas de transporte para satisfacer las necesidades de las plantas de energía a un costo mínimo y un impacto ambiental mínimo [7]. Por otro lado, Sánchez-Bautista *et al.* (2018) desarrollaron un modelo de programación matemática para la planificación óptima de un sistema integrado para producir combustibles y biocombustibles considerando la interacción con instalaciones capaces de capturar emisiones de biorrefinerías y refinerías y recibir un beneficio monetario. Este enfoque propuesto analiza el beneficio de las biorrefinerías, refinerías y plantaciones forestales, así como las emisiones y los empleos generados en cada una de las entidades involucradas. Adicionalmente, toman en cuenta las materias primas locales e importadas para satisfacer la demanda energética. Además, se enfocaron en características tales como la vida del proyecto, la disponibilidad de recursos, cantidad y tipo de productos que deben producirse y la asignación y capacidad de las refinerías, biorrefinerías y plantaciones forestales. El enfoque

CAPÍTULO I

matemático se aplicó a un estudio a nivel nacional para México, considerando la creación de nuevos empleos, las emisiones generales y la ganancia neta como objetivos principales [8].

Sin embargo, no solo se debe contemplar la generación de energía eléctrica si no también la materia que se requiere para su producción, es por ello que se toman en consideración los combustibles fósiles con los cuales se genera la electricidad en tecnologías convencionales. Arredondo-Ramírez *et al.* (2016) desarrollaron un modelo matemático capaz de determinar los escenarios óptimos de infraestructura, configuración y producción del gas *shale*, las plantas de tratamiento y la distribución de las redes de gas natural en un horizonte de tiempo específico [9]. Como se mencionó anteriormente, la obtención de petróleo es esencial para la producción de energía eléctrica de forma convencional por lo que la manera de obtención de este combustible es importante para la presente investigación, como se sabe la extracción de petróleo de manera convencional recupera un bajo porcentaje del que realmente está en el yacimiento, es por ello que se han investigado diferentes tecnologías para estimular el suelo y obtener más producción. En este sentido, Blunt *et al.* (1993) mencionan que al utilizar agua para desplazar el petróleo se obtiene un 50% de recuperación y después se utiliza CO₂ para obtener el remanente; sin embargo, es más factible utilizar el CO₂ porque proviene de fuentes naturales y es relativamente más barato [10]. Muggeridge *et al.* (2014) presentaron un trabajo en el cual analizaron las tecnologías EOR (recuperación mejorada de petróleo) existentes y las emergentes, como son la inyección de agua con baja salinidad y la desviación profunda del caudal del yacimiento, discutiendo su aplicación y limitaciones y centrándose en los avances recientes de la permeabilidad de las rocas [11]. Por otro lado, Patel *et al.* (2015) propusieron la “recuperación microbiana mejorada” (Microbiana Enhanced Oil Recovery o MEOR por sus siglas en inglés) a partir del uso de la biotecnología para mejorar la producción del petróleo crudo residual de los pozos [12]. En este sentido, Nielsen *et al.* (2016) establecieron que la recuperación microbiana del petróleo mejorado (MEOR) utiliza microbios para mejorar la recuperación mediante varios mecanismos, entre los cuales los más estudiados son la reducción de tensión de interfases entre el aceite y el agua por el biosurfactante producido y microbios así como productos metabólicos. Una de las maneras de supervivencia bacteriana y propagación bajo condiciones duras del yacimiento es la formación de esporas, es por ello que desarrollaron un modelo que explica el crecimiento bacteriano, el consumo del sustrato, la producción de tensoactivos, la fijación/filtración, la esporulación y la reactivación.

CAPÍTULO I

Además de que incluyen bacterias formadoras de esporas. Donde, el papel del tensoactivo es la modificación de las permeabilidades relativas disminuyendo la tensión interfacial. La fijación de bacterias reduce el espacio de poros disponible para el flujo, es decir, la porosidad y permeabilidad efectivas [13].

1.3. Justificación

De acuerdo a la demanda energética que año con año va en aumento, debido al crecimiento de la población, así como a la industrialización y crecimiento del país en general, es importante considerar el tipo de tecnología con la cual se va a satisfacer la demanda energética. Más allá del tipo de obtención energética, es necesario analizar los costos anuales totales involucrados para cada caso en los cuales se consideran los combustibles utilizados, capacidad de cada planta, costos de operación y mantenimiento, costos unitarios, potencia requerida, entre otros. Así como el aspecto más importante que es la obtención energética de manera sustentable, para ello se busca disminuir los agentes contaminantes que afectan el medio ambiente. En la actualidad la forma de obtención de energía eléctrica se encuentra mayormente relacionada a energías convencionales, esto sin considerar que los combustibles fósiles pronto llegarán a su fin y que la producción de emisiones contaminantes va en aumento. Debido a que la demanda energética está establecida anualmente, se busca disminuir las emisiones, por lo que se debe sustituir las plantas productoras convencionales por plantas limpias. Este aspecto es muy importante estudiar debido a la alta demanda energética y contaminación que de su obtención procede, sin dejar a un lado el consumo de agua requerido para satisfacer la demanda energética, ya que gracias al uso incontrolable para este fin se ha modificado el ecosistema y contaminando el agua en bajas concentraciones.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático para evaluar la demanda energética en sus diferentes formas de producción convencional y limpia a nivel nacional.

1.4.2. Objetivos particulares

- Desarrollar un modelo de optimización sobre la planificación estratégica para la generación de energía eléctrica considerando energías limpias y convencionales, considerando en estas últimas el uso de combustibles fósiles.

CAPÍTULO I

- El modelo propuesto debe considerar los aspectos para satisfacer la demanda energética, impacto ambiental, así como aspectos económicos.
- Considerar costos de operación y mantenimiento, costos de combustible y costos unitarios de cada planta productora.
- Especificar el impacto ambiental respecto al consumo de agua así como la manera de minimizar dicho impacto.

1.5. Hipótesis

El uso de un modelo matemático y su codificación, permitirá estimar la predicción del costo anual total para satisfacer cierta demanda energética, así como la reducción de la cantidad de emisiones producidas para la producción de energía y la cantidad de agua suministrada a las centrales eléctricas. Dicho modelo propondrá, en caso de ser necesario, el tipo de tecnología nueva que debe instalarse para cubrir la demanda de energía especificada.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

En el presente capítulo se discuten los conceptos que definen el siguiente trabajo de investigación, con el fin de abundar a cerca de la información básica para el entendimiento de los siguientes capítulos. En la tercera sección se discuten las principales centrales generadoras de energía a base de tecnologías convencionales. En la sección nueve se presenta una breve explicación de tecnologías limpias, lo que nos permitirá construir un modelo que se describe en los siguientes capítulos.

2.2. Energía eléctrica

La obtención de energía eléctrica en México se encuentra clasificada principalmente en dos grupos (Figura 1): tecnologías convencionales y tecnologías limpias; las cuales tienen su principal diferencia en el impacto ambiental que producen.



Figura 1. Clasificación de tecnologías

La producción de energía eléctrica depende del tipo de tecnología, a continuación se muestra el porcentaje que aporta cada tecnología para la generación de energía en el año del 2017 [1].

CAPÍTULO II

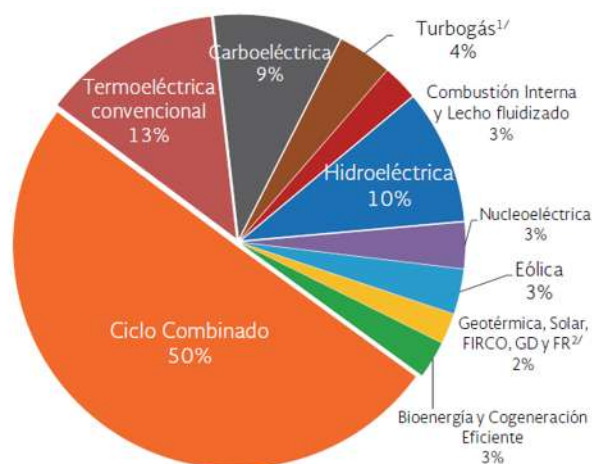


Figura 2. Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología SENER

2.3. Tecnologías convencionales

El grupo de tecnologías convencionales se integra por las unidades y centrales que generan energía eléctrica a partir del uso de combustibles fósiles como energético primario y no cuentan con un equipo de captura y confinamiento de CO₂ (Figura 3). Estas centrales suelen satisfacer la demanda base, como es el caso de los ciclos combinados, o en algunos casos las centrales de turbogás. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), las tecnologías convencionales para la generación eléctrica contribuyen con el 18% de las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a nivel nacional (es la segunda actividad del país con mayor impacto ambiental, después del transporte), con un volumen anual equivalente a 125 mil millones de toneladas de CO₂ [2]. Este grupo incluye las tecnologías: carboeléctrica, ciclo combinado, combustión interna, termoeléctrica convencional y turbogás.



Figura 3. Generación de energía a partir de combustibles fósiles

2.4. Ciclo combinado

Las centrales de generación de energía eléctrica de ciclo combinado se integran por dos tipos de unidades de generación: turbogás (gasoelectricas) y vapor (termoelectricas) (Figura 4). El proceso de generación de energía comienza aspirando el aire desde el medio ambiente exterior, que siendo conducido a través de un filtro llega al compresor de la turbina de gas, este aire es comprimido y mezclado con gas natural por medio de una cámara especialmente diseñada para realizar la combustión, dando como resultado la expansión de un flujo de gases a elevada presión y temperatura que transmiten su energía al entrar en la turbina de gas impulsando su movimiento, el generador acoplado a la turbina de gas, transforma el movimiento transmitido en energía eléctrica. Los gases de escape de la turbina de gas se utilizan como fuente de calor por recuperación de calor y este último hace las funciones de caldera para alimentar de vapor sobrecalentado la sección de alta presión de la turbina de vapor [2].

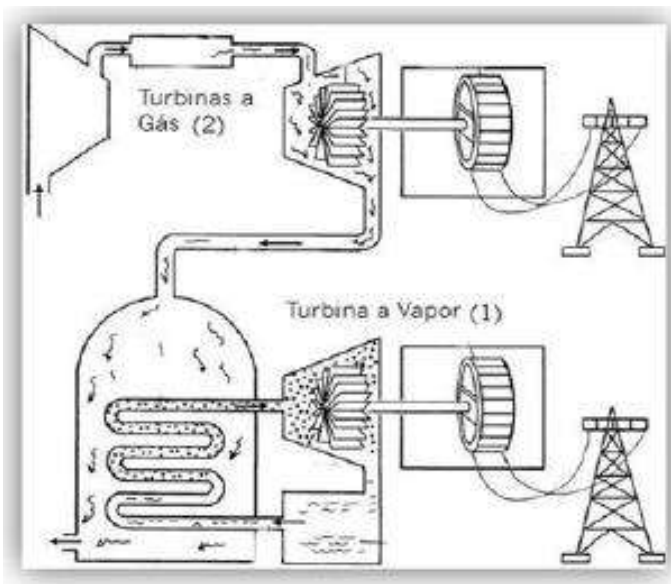


Figura 4. Diagrama de central de ciclo combinado

En México predomina la generación eléctrica a partir de ciclos combinados. Actualmente existen 83 centrales eléctricas con una capacidad instalada total de 28,084 MW equivalente al 37% de la capacidad instalada nacional [1].

2.5. Termoeléctrica convencional

En México existen 59 centrales termoeléctricas convencionales cuya capacidad instalada total es de 12,546 MW, equivalente al 17% del total nacional. Representa el 13% del total de la electricidad generada en 2017.

El principio de generación de electricidad en una central térmica convencional es la transformación del agua en vapor, el cual se expande en una turbina que, al darse la condición de presión y temperatura idónea, provoca un movimiento mecánico para impulsar el generador y producir así la electricidad. Posteriormente, el vapor abandona la turbina y pasa a estado líquido por medio de un condensador, para que el agua se almacene nuevamente y comience el ciclo de transformación.

Las centrales termoeléctricas convencionales pueden utilizar gran variedad de combustibles, entre ellos: carbón, gas natural, y derivados del petróleo como el diésel y el combustóleo, que se caracterizan por su alto nivel de emisiones contaminantes [1].

2.6. Turbogás

La generación de energía eléctrica en las unidades de turbogás se logra aprovechando directamente, en los álabes de la turbina de gas, la energía cinética que resulta de la expansión de aire y gases de la combustión, comprimidos (Figura 5). Debido a los efectos de las condiciones atmosféricas, se ha establecido que el desempeño de las turbinas de gas sea evaluado bajo determinadas normas o estándares.

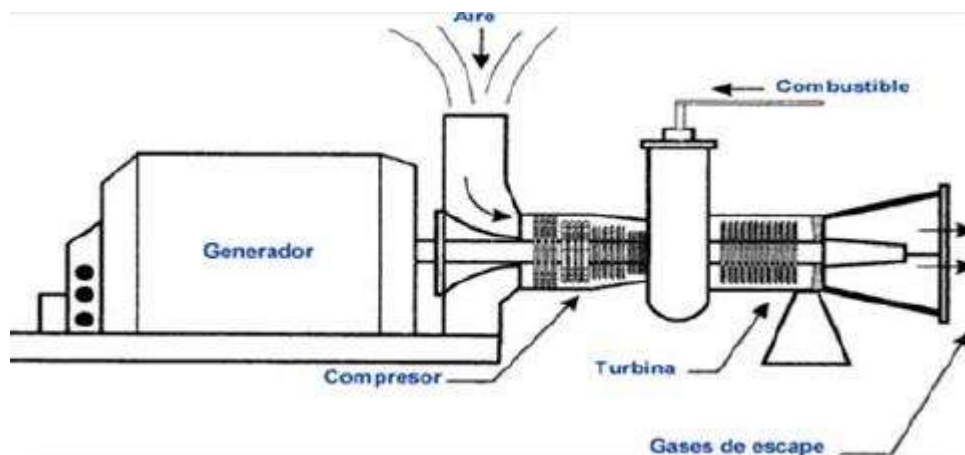


Figura 5. Ciclo de la turbina de gas

Una de estas normas corresponde a la International Organization for Standardization (ISO), la cual indica una temperatura ambiente de 15°C, y presión atmosférica a nivel del mar. Cada turbina de gas tiene un comportamiento diferente al cambiar las condiciones atmosféricas [2].

En el país operan 131 centrales de turbogás que representan el 7% de la capacidad total y 4% de la generación eléctrica en 2017. Las plantas de turbinas de gas son utilizadas principalmente para atender la demanda punta debido a su capacidad de arranque rápido; utilizan como principales fuentes de energía primaria el gas natural y el diésel, son menos eficientes que el resto de las tecnologías convencionales (ofrecen una eficiencia media de 36%), y en promedio emiten 509 kilogramos de CO₂ por MWh con gas, o más de 660 kilogramos de CO₂ por MWh con diésel [1].

2.7. Combustión interna

El principio de funcionamiento de una central de combustión interna (fuente de energía: combustóleo, diésel, etc.) sigue la tecnología de los motores diésel, esto es, aprovecha la expansión de los gases de combustión para obtener energía mecánica, la cual a su vez es transformada en energía eléctrica en el generador [2]. El proceso de generación por combustión interna es equivalente al de una central termoeléctrica convencional; sin embargo, la combustión se realiza dentro de un motor que comprime el aire y aumenta su temperatura, y al entrar en contacto con el combustible (diésel) provoca el proceso de combustión [1].

2.8. Carboeléctrica

México cuenta con tres centrales carboeléctricas cuya capacidad conjunta es de 5,378 MW equivalentes al 7% de toda la capacidad instalada. La concepción básica de una central carboeléctrica es análoga a una central termoeléctrica. El cambio principal radica en el generador de vapor, el cual es más complejo, de mayores dimensiones y con superficies más grandes para la transferencia de calor. Además, requiere de un tratamiento especial del combustible, el cual consiste en la pulverización y secado del carbón, así como de sistemas anticontaminantes como colectores de bolsas y equipos de desulfuración.

A nivel mundial, el carbón representa la fuente principal de energía para la generación de electricidad. Los países con mayor generación eléctrica a partir de esta fuente energética son China y Estados Unidos de América.

Si bien, una carboeléctrica es más eficiente que una termoeléctrica convencional, el uso del carbón como combustible primario para la generación de electricidad origina importantes emisiones contaminantes (en promedio emite 773 kilogramos de CO₂ por MWh) y afecta a los equipos y materiales de la central generadora [1].

2.9. Tecnologías limpias

Las tecnologías consideradas limpias corresponden a centrales cuya fuente de energía y procesos de generación de electricidad producen emisiones o residuos en cantidades menores que los umbrales establecidos en las diversas disposiciones aplicables, algunas son: hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar fotovoltaica y termosolar (Figura 6).

CAPÍTULO II

México cuenta con un portafolio amplio de energías limpias, gracias a sus condiciones geográficas y climáticas, ya que puede disponer del viento, la radiación solar, los océanos, los mares, los ríos, los yacimientos geotérmicos, los bioenergéticos (biomasa y biogás), el metano y otros gases asociados a residuos sólidos u orgánicos, la energía nuclear y la energía generada por las centrales de cogeneración eficiente [1].



Figura 6. Energías limpias

Para que una fuente de energía o proceso de generación eléctrica pueda ser considerado como Energía Limpia, sus emisiones de CO₂ deberán ser menores a los 100 kilogramos por cada MWh generado, en tanto no se expidan las disposiciones que determinen los umbrales máximos de emisiones o residuos aplicables a Energías Limpias.

2.10. Hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas varían en diseño, capacidad y tamaño, según las condiciones topográficas y geológicas de los lugares donde está disponible el recurso hídrico; tienen bajos costos de operación, pero sus costos de inversión son mayores debido a la magnitud de la construcción de las plantas, generalmente se encuentran lejos de los centros de carga por lo que requieren extensas líneas de transmisión. Las centrales hidroeléctricas se clasifican en dos grupos:

CAPÍTULO II

a. Grandes centrales hidroeléctricas: aquellas en las que se regula de forma anual o multianual la capacidad hidráulica almacenada, con la finalidad de maximizar la generación, y permitir el desarrollo de las actividades de otros sectores, como el agrícola.

b. Centrales hidroeléctricas menores: aquellas en las que no se regula o se regula de forma horaria, diaria o semanal los caudales turbinados, por lo que su producción de energía eléctrica suele ser en periodos cortos de tiempo a fin de minimizar la posibilidad de derrames [1].

2.11. Eólica

Las centrales eólicas aprovechan la energía cinética del viento para producir electricidad mediante turbinas eólicas (aerogeneradores). Un aerogenerador o turbina eólica es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica que impulsa un generador para producir electricidad. Los países con la mayor capacidad instalada en parques eólicos son China, Estados Unidos de América, Alemania, España y Reino Unido, con la cual generan el 65% de la energía eólica mundial. México se ubica dentro de los primeros 20 países con la mayor generación de electricidad por medio del viento [1].

2.12. Geotérmica

Las centrales geotérmicas operan con el mismo principio que las centrales convencionales, con la diferencia de que éstas obtienen el vapor del subsuelo. El vapor geotérmico se envía a un separador de humedad para transformar la energía cinética en mecánica, cuyo movimiento se transmite al generador para producir electricidad. La geotermia es una energía renovable que normalmente proporciona la generación de carga base, ya que su operación no se ve afectada por variaciones climatológicas o estacionales a diferencia de otras tecnologías renovables intermitentes. México cuenta con ocho centrales geotermoelectricas (Una en Nayarit, cuatro en Baja California Norte, una en Michoacán, una en Puebla y una en Baja California Sur), que representan el 1.2% de la capacidad total [1].

2.13. Solar fotovoltaica

La tecnología de una planta solar consiste en la conversión de la luz solar en electricidad por medio de un dispositivo semiconductor (celdas fotovoltaicas) o bien, mediante concentradores solares que elevan la temperatura de un fluido que pasa a una turbina conectada a un generador para producir electricidad. La energía solar fotovoltaica es una

CAPÍTULO II

tecnología que no requiere el uso de combustibles, por lo que puede ser utilizada cerca de los centros de consumo reduciendo la congestión del sistema eléctrico. Su dependencia del recurso solar provoca intermitencia en la generación, no obstante, la disponibilidad del recurso es altamente predecible respecto a otras fuentes intermitentes, con auxilio de tecnologías de pronóstico existentes. El país cuenta con 23 centrales fotovoltaicas en operación, mismas que representan menos del 0.4% de la capacidad total [1].

2.14. Termosolar

La tecnología termosolar permite generar electricidad mediante colectores solares de canal parabólicos, de plato o torre, colocados en filas paralelas de forma similar a los campos solares fotovoltaicos. Dichos colectores tienen la función de concentrar la radiación solar sobre un receptor lineal por el cual un fluido captura y transfiere la energía calorífica a un intercambiador de calor, donde se produce parte del vapor que impulsa la turbina para generar la electricidad [1].

2.15. Optimización

La optimización tiene como propósito analizar e identificar la mejor solución posible, entre todas las soluciones potenciales. La idea de aplicar los diferentes métodos de optimización es facilitar el rendimiento y el manejo de los parámetros que componen un sistema o proceso. La palabra optimización, comparte la misma raíz que “óptimo”. Es el uso de métodos específicos para determinar la solución más rentable y eficiente para un problema o diseño para un proceso. A través de la optimización se pueden resolver una amplia variedad de problemas en el diseño, construcción, operación y análisis de plantas químicas (así como de muchos otros procesos industriales). Esta técnica es una de las principales herramientas cuantitativas en la toma de decisiones industriales. La optimización se ocupa en seleccionar el mejor entre un sistema entero mediante métodos cuantitativos eficientes. Las computadoras y el software asociado hacen que los cálculos necesarios sean factibles y rentables. Sin embargo, para obtener información útil al utilizar computadoras se requiere: un análisis crítico del proceso o diseño, visión sobre cuáles son los objetivos que se deben lograr y el uso de experiencias pasadas.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En este capítulo se muestran una serie de procedimientos que se aplican durante el presente trabajo de investigación para lograr el objetivo deseado. En la sección dos, primeramente se da una breve explicación acerca del planteamiento del problema, lo que lleva a la sección tres, en la cual se propone una superestructura para continuar con un modelo matemático. Cabe resaltar que en la sección cuatro se plantea un modelo matemático que describe el proceso deseado para dicha problemática energética.

3.2. Planteamiento del problema

Debido a que las necesidades de energía eléctrica van en aumento de acuerdo al crecimiento de la población, se involucran procesos de obtención energética convencionales que a su vez requieren combustibles fósiles para su funcionamiento. Por lo antes mencionado, los combustibles fósiles convencionales están en decremento. Aunque se busca que la obtención de energía eléctrica sea capaz de satisfacer la demanda energética, no siempre se toman en cuenta los costos más factibles, ni mucho menos el impacto ambiental. Por lo que, en este trabajo se pretende encontrar y evaluar el arreglo óptimo que debe existir en cada tipo de tecnología productora de energía eléctrica para que sean menos agresivas con el medio ambiente y se encuentre la mejor opción económicamente hablando, considerando el caso específico de México.

3.3. Formulación de optimización propuesta

Se propone una superestructura, la cual representa el problema energético presente en México, se compone de plantas productoras de energía eléctrica de diez tipos de tecnología para su producción.

El problema energético se comenzará abordando respecto al tipo de tecnología usada para la producción de energía eléctrica desde dos clasificaciones, las cuales son: convencionales (ciclo combinado, termoeléctrica convencional, carboeléctrica, turbogás y combustión interna) y limpias (hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar fotovoltaica y

CAPÍTULO III

termosolar). Asimismo, se busca realizar una predicción a futuro acerca de la cantidad de potencia energética requerida en el periodo 2020-2030, el cual busca encontrar la solución óptima reduciendo el costo anual total para dicha planeación, relacionando plantas existentes así como plantas nuevas que serán requeridas en cada periodo de tiempo para satisfacer la demanda de potencia.

Principalmente se contempla realizar una minimización del costo total anual requerido para la producción de energía, así como de las emisiones y consumo de agua que resultan de dicho proceso, para ello se requiere de un análisis a detalle que abarca distintos parámetros y variables de los que a continuación se hará mención de algunos: potencia existente de plantas convencionales, capacidad instalada de las plantas existentes, cantidad de combustible utilizado para la producción de energía en plantas convencionales, costos de operación y mantenimiento en plantas existentes y nuevas, potencia requerida en plantas nuevas convencionales, capacidad instalada en plantas existentes y nuevas, costo de inversión por tipo de tecnología, emisiones de bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, partículas y cantidad de agua requerida por tipo de tecnología para cierta cantidad de energía producida.

Cabe resaltar que se hace una distinción entre plantas existentes y nuevas, las primeras son aquellas que se encuentran instaladas en el momento y las segundas son aquellas que se espera se instalen para satisfacer la demanda energética que se espera en cada periodo de tiempo. Se pretende encontrar con el uso de una variable binaria, el tipo de planta nueva que se requerirá activar en cada periodo para satisfacer la demanda energética, esto a su vez se liga con el uso de restricciones, las cuales contemplan a grandes rasgos: la demanda energética, demanda energética de tecnologías limpias y capacidad instalada de las tecnologías nuevas.

Por otro lado, las tecnologías nuevas y existentes abarcan los dos tipos de plantas mencionadas anteriormente (convencionales y limpias), lo que se pretende es que se activen más plantas limpias que convencionales para reducir las emisiones y consumo de agua que a su vez reducen la contaminación ambiental, esto sin dejar a un lado el costo anual total, con lo anterior se llegará un equilibrio desde el punto de vista económico y sostenible.

CAPÍTULO III

Es importante mencionar que esta propuesta fue codificada en el software GAMS® por primera vez bajo estas condiciones en este trabajo de investigación, para mayor profundidad visualizar el apartado de ANEXOS.

3.4. Modelo matemático

En esta sección se presenta un modelo matemático de las centrales eléctricas para la planificación y producción de energía eléctrica en una región macroscópica. En el modelo propuesto se representa el comportamiento de plantas productoras de energía eléctrica nuevas y existentes en las que se engloban convencionales y limpias, relacionando lo anterior con factores económicos, ambientales y de demanda energética, respecto a un periodo de tiempo.

3.4.1. Plantas de energía existentes

Energía producida en plantas convencionales

La energía generada depende del combustible utilizado, así como un factor para las plantas existentes.

$$P_{enc,t}^{exist} = f_{enc,t}^{exist} \cdot \alpha_{enc,t}^{exist} \quad \forall enc, \quad \forall t \quad (1)$$

$P_{enc,t}^{exist}$ Potencia producida en plantas existentes convencionales en periodo t (GWh)

t Periodo (años)

$f_{enc,t}^{exist}$ Combustible utilizado en plantas convencionales en periodo t (ft³)

$\alpha_{enc,t}^{exist}$ Factor de eficiencia de combustible en plantas convencionales en periodo t (GWh/ ft³)

Capacidad instalada

La capacidad está sujeta a ser mayor o igual a la energía producida.

$$P_{e,t}^{exist} \leq Cap_{e,t}^{exist} \quad \forall e, \quad \forall t \quad (2)$$

$Cap_{e,t}^{exist}$ Capacidad instalada en plantas existentes en periodo t (GWh)

$P_{e,t}^{exist}$ Potencia producida en plantas existentes en periodo t (GWh)

Costo de operación y mantenimiento

La producción de energía existente está asociada a la energía producida con respecto al combustible utilizado. Donde, el factor del valor presente $(1+r)^t$ involucra una tasa de interés, en un período de tiempo

$$C_{OYM}^{exist} = \sum_t \sum_e \frac{\beta_{e,t}^{exist} \cdot P_{e,t}^{exist}}{(1+r)^t} \quad (3)$$

C_{OYM}^{exist} Costo de operación y mantenimiento en plantas existentes (\$)

$\beta_{e,t}^{exist}$ Factor de costo para plantas existentes en periodo t (\$/GWh)

$P_{e,t}^{exist}$ Potencia producida en plantas existentes en periodo t (GWh)

r Tasa de descuento

3.4.2. Plantas nuevas

Energía producida

La energía generada depende del combustible utilizado, así como un factor para las plantas existentes

$$P_{n,t}^{new} \leq P_n^{\max} \cdot y_n^{new}, \quad \forall n, \quad \forall t \quad (4)$$

$P_{n,t}^{new}$ Potencia producida en plantas nuevas en periodo t (GWh)

$P_n^{\max}$ Potencia máxima producida en plantas nuevas en periodo t (GWh)

y_n^{new} Variable binaria (0 ó 1)

Potencia producida en plantas convencionales

En esta sección del modelo matemático toma en consideración el uso de combustible, ya que las plantas convencionales requieren utilizarlo para su funcionamiento.

CAPÍTULO III

$$P_{nnc,t}^{new} = f_{nnc,t}^{new} \cdot \alpha_{nnc,t}^{new} \quad \forall nnc, \quad \forall t \quad (5)$$

$P_{nnc,t}^{new}$ Potencia producida en plantas nuevas convencionales en periodo t (GWh)

$f_{nnc,t}^{new}$ Combustible utilizado en plantas convencionales en periodo t (ft³)

$\alpha_{nnc,t}^{new}$ Eficiencia de plantas convencionales en el periodo t (GWh/ ft³)

Capacidad instalada

La capacidad instalada está sujeta a la potencia generada de energía eléctrica en plantas nuevas:

$$P_{n,t}^{new} \leq Cap_n^{new} \quad \forall n, \quad \forall t \quad (6)$$

Cap_n^{new} Capacidad instalada en plantas nuevas (GWh)

$P_{e,t}^{new}$ Potencia producida en plantas nuevas en periodo t (GWh)

$$Cap_n^{new} \leq \omega^{cap} y_n^{new} \quad \forall n \quad (7)$$

Cap_n^{new} Capacidad instalada en plantas nuevas (GWh)

ω^{cap} Potencia producida en plantas nuevas en periodo t (GWh)

y_n^{new} Variable binaria

Costo de unidades nuevas

La producción de energía nueva está asociada a la energía producida con respecto al combustible utilizado. Donde, el factor del valor presente $(1+r)^t$ involucra una tasa de interés, en un período de tiempo:

$$C_{OYM}^{new} = \sum_t \sum_n \frac{\beta_{n,t}^{new} \cdot P_{n,t}^{new}}{(1+r)^t} \quad (8)$$

C_{OYM}^{new} Costo de operación y mantenimiento en plantas nuevas (\$)

$\beta_{n,t}^{new}$ Factor de costo para plantas nuevas en periodo t (\$/GWh)

$P_{n,t}^{new}$ Potencia producida en plantas nuevas en periodo t (GWh)

r Tasa de descuento

Costo de inversion de unidades nuevas

$$C_{inv\ n}^{new} = \frac{\gamma_n^{new} \cdot Cap_n^{new}}{(1+r)^t} + \omega^{\cos inv} y_n^{new} \quad \forall n \quad (9)$$

$C_{inv\ n}^{new}$ Costo total de inversión en plantas nuevas (\$)

Cap_n^{new} Capacidad instalada en plantas nuevas (GWh)

$\omega^{\cos inv}$ Costo de inversión en plantas nuevas (\$)

y_n^{new} Variable binaria

γ_n^{new} Costo de producción por cantidad de energía en plantas nuevas (\$/GWh)

3.4.3. Demanda

La demanda es satisfecha por la suma de la energía existente y la nueva energía, que es válida por cualquier período de tiempo:

$$P_t^{demand} = \sum_e P_{e,t}^{exist} + \sum_n P_{n,t}^{new} \quad (10)$$

P_t^{demand} Demanda energética en periodo t (GWh)

$P_{e,t}^{exist}$ Potencia producida en plantas existentes en periodo t (GWh)

$P_{n,t}^{new}$ Potencia producida plantas nuevas en periodo t (GWh)

3.4.4. Energía limpia

Energía producida a partir de energías limpias

Recursos de fuentes renovables y limpias que pueden utilizarse para la generación de energía eléctrica.

$$P_t^{clean} \geq \sum_{ec} P_{ec,t}^{exist} + \sum_{nc} P_{nc,t}^{new} \quad \forall t \quad (11)$$

P_t^{clean} Energía limpia en periodo t (GWh)

$P_{ec,t}^{exist}$ Potencia producida en plantas existentes limpias en periodo t (GWh)

$P_{nc,t}^{new}$ Potencia producida en plantas nuevas limpias en periodo t (GWh)

ec Plantas existentes limpias

nc Plantas nuevas existentes

3.4.5. Emisiones contaminantes

En la generación de energía eléctrica se producen una serie de emisiones contaminantes que van directamente a la atmosfera, para obtener la cantidad total de dichas emisiones se hace una descripción a continuación.

Las emisiones de bióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y partículas, se basan en la energía producida en plantas convencionales, lo cual se relaciona con un factor de emisión de unidades existentes y nuevas.

$$Emissco_2 = \sum_{enc} \sum_t \phi_{enc,t}^{emiss-existco_2} \cdot P_{enc,t}^{exist} + \sum_{nnc} \sum_t \phi_{nnc,t}^{emiss-newco_2} \cdot P_{nnc,t}^{new} \quad (12)$$

$$Emissno_x = \sum_{enc} \sum_t \phi_{enc,t}^{emiss-existno_x} \cdot P_{enc,t}^{exist} + \sum_{nnc} \sum_t \phi_{nnc,t}^{emiss-newno_x} \cdot P_{nnc,t}^{new} \quad (13)$$

$$Emissso_2 = \sum_{enc} \sum_t \phi_{enc,t}^{emiss-existso_2} \cdot P_{enc,t}^{exist} + \sum_{nnc} \sum_t \phi_{nnc,t}^{emiss-newso_2} \cdot P_{nnc,t}^{new} \quad (14)$$

$$Emisspart = \sum_{enc} \sum_t \phi_{enc,t}^{emiss-existpart} \cdot P_{enc,t}^{exist} + \sum_{nnc} \sum_t \phi_{nnc,t}^{emiss-newpart} \cdot P_{nnc,t}^{new} \quad (15)$$

CAPÍTULO III

E_{miss}	Emisiones (kg)
$\phi_{enc,t}^{emiss-exist}$	Factor de emisión para plantas existentes convencionales en periodo t (kg/GWh)
$\phi_{nnc,t}^{emiss-new}$	Factor de emisión para plantas nuevas convencionales en periodo t (kg/GWh)
$P_{enc,t}^{exist}$	Potencia producida en plantas existentes convencionales en periodo t (GWh)
$P_{nnc,t}^{new}$	Potencia producida en plantas nuevas convencionales en periodo t (GWh)
CO_2	Bióxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrógeno
SO_2	Dióxido de azufre
$part$	Partículas

3.4.6. Agua

El consumo de agua para la generación de energía depende del tipo de tecnología utilizada, para calcular el total de agua suministrada a las plantas productoras de energía se procederá a la suma de las plantas existentes y nuevas, como se muestra a continuación:

$$Water = \sum_e \sum_t \delta_{e,t}^{water-exist} \cdot P_{e,t}^{exist} + \sum_n \sum_t \delta_{n,t}^{water-new} \cdot P_{n,t}^{new} \quad (16)$$

$Water$	Consumo de agua (ft ³)
$\delta_{e,t}^{water-exist}$	Factor de consumo de agua en plantas existentes en periodo t (ft ³ /GWh)
$\delta_{n,t}^{water-new}$	Factor de consumo de agua en plantas nuevas en periodo t (ft ³ /GWh)
$P_{e,t}^{exist}$	Potencia producida en plantas existentes en periodo t (GWh)
$P_{n,t}^{new}$	Potencia producida en plantas nuevas en periodo t (GWh)

CAPÍTULO III

3.4.7. Costo anual total

El costo total anual implica la suma de los costos de operación y mantenimiento de las centrales eléctricas nuevas y existentes, así como los costos de inversión.

$$TAC = C_{O\&M}^{exist} + C_{O\&M}^{new} + C_{inv}^{new} \quad (17)$$

TAC	Costo anual total (\$)
$C_{O\&M}^{exist}$	Costo de operación y mantenimiento en plantas existentes (\$)
$C_{O\&M}^{new}$	Costo de operación y mantenimiento en plantas nuevas (\$)
C_{inv}^{new}	Costo total de inversión en plantas nuevas (\$)

3.4.8. Función objetivo

Se implementa una función objetivo, por un lado es necesario reducir el impacto ambiental por la producción de energía, y por otro lado se considera la reducción en el costo total del mismo proceso, estos dos objetivos se consideran para desarrollar una formulación de optimización.

$$O.F = \{minimizar TAC, emisiones, agua\} \quad (18)$$

$O.F$	Función objetivo
-------	------------------

3.5. Descripción del caso de estudio

El consumo de energía eléctrica en México va en aumento, con lo cual a su vez la demanda de energía aumenta año con año. A continuación, se presentan distintos escenarios en los que su principal variable es la demanda energética a una proyección de un periodo de tiempo que va comprendido del 2020 a 2030. Los escenarios que se describen a continuación pretenden expresar proyecciones pesimistas, optimistas y conservadoras, con las cuales se puedan plantear opciones posibles para obtener resultados numéricos y gráficos con los que se realicen comparaciones para deducir el comportamiento de la demanda energética y las consecuencias que conlleva.

3.5.1. Escenario A

En este primer caso se considera una demanda de energía eléctrica que crece linealmente respecto al tiempo, aproximadamente en un 4%. Comienza con una demanda de 730,000.00 Gwh durante el año 2020 y comienza el aumento de demanda antes descrito, terminando en 1,080,578.33 Gwh. El porcentaje de aumento se eligió contemplando el aumento de población.

3.5.2. Escenario B

En este modelo se considera una demanda de energía eléctrica, la cual se mantiene constante, es decir se visualiza un escenario energético conservador con una demanda energética de 2020 a 2030 de 730,000.00 Gwh.

3.5.3. Escenario C

En este caso en particular, se considera una demanda de energía eléctrica constante durante los primeros cinco años de la proyección (2020-2024) con 730,000.00 Gwh. Resaltando que durante el periodo 2025-2030 la demanda comenzará en aumento, oscilando aproximadamente entre un 4% y un 6.6%. Esto con el fin de mantener los primeros años constantes y estimando un aumento gradual de población que se puede proyectar en años futuros.

CAPÍTULO III

3.5.4. Escenario D

En este escenario se considera una demanda de energía eléctrica que crece exponencialmente en relación al tiempo, se propone una estimación que comienza en 730,000.00 Gwh y termina con 1,456,042.21 Gwh respecto a la demanda energética.

A continuación, se muestra la Tabla 1 con el resumen de los escenarios antes descritos, cabe mencionar que son escenarios supuestos que pueden ocurrir en años futuros.

Tabla 1. Demanda energética de escenarios

<i>Escenario A</i>		<i>Escenario B</i>		<i>Escenario C</i>		<i>Escenario D</i>	
Año	Demanda (Gwh)	Año	Demanda (Gwh)	Año	Demanda (Gwh)	Año	Demanda (Gwh)
2020	730,000.00	2020	730,000.00	2020	730,000.00	2020	730,000.00
2021	759,200.00	2021	730,000.00	2021	730,000.00	2021	780,979.21
2022	789,568.00	2022	730,000.00	2022	730,000.00	2022	835,800.59
2023	821,150.72	2023	730,000.00	2023	730,000.00	2023	894,773.65
2024	853,996.75	2024	730,000.00	2024	730,000.00	2024	958,234.39
2025	888,156.62	2025	730,000.00	2025	759,200.00	2025	1,026,547.64
2026	923,682.88	2026	730,000.00	2026	793,364.00	2026	1,100,109.73
2027	960,630.20	2027	730,000.00	2027	833,032.20	2027	1,179,351.29
2028	999,055.41	2028	730,000.00	2028	878,848.97	2028	1,264,740.43
2029	1,039,017.62	2029	730,000.00	2029	931,579.91	2029	1,356,786.17
2030	1,080,578.33	2030	730,000.00	2030	993,064.18	2030	1,456,042.21
Total	9,845,036.53	Total	8,030,000.00	Total	8,839,089.26	Total	11,583,365.30

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en los escenarios antes descritos en el capítulo III sección 3.5.

La formulación de optimización propuesta fue codificada en el software GAMS®, el cual contiene las ecuaciones antes descritas en el apartado 3.4. El principal objetivo del modelo propuesto fue minimizar el costo anual total y la parte ambiental, en las secciones siguientes se explica a detalle la variable a tratar.

Para que el funcionamiento del modelo en GAMS® fuera posible, se hizo una clasificación de variables, variables positivas, *sets*, *subsets*, variables binarias y parámetros, para lo cual se realizó un análisis previo a detalle, para mayor información visualizar el apartado ANEXOS.

4.2. Demanda

Primeramente se representa el comportamiento de la demanda respecto a un periodo de tiempo (2020-2030) para cada escenario planteado anteriormente, en el eje de las abscisas se encuentra la demanda energética en Gwh, así como en el eje de las ordenadas se especifica el periodo de tiempo con el cual se trabaja cada escenario.

Como se visualiza en la Figura 7, la demanda en el escenario A crece linealmente conforme aumenta el tiempo, en el escenario B la demanda se mantiene constante a lo largo del periodo de tiempo, así mismo en el escenario C, en el cual se mantiene constante durante los primeros 5 años y crece el periodo siguiente. Haciendo referencia al escenario D, la demanda energética crece exponencialmente y se representa claramente ya que es el escenario que más sobresale respecto al eje de las ordenadas.

CAPÍTULO IV

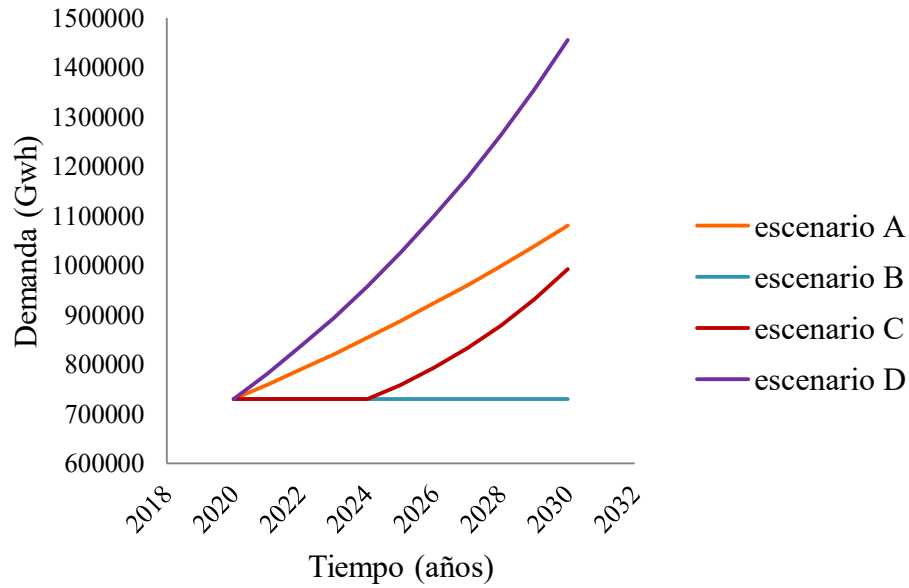


Figura 7. Demanda energética vs tiempo

4.3. Aspectos económicos

Se procede a ejecutar la formulación de optimización propuesta que fue codificada en el software GAMS®, el cual contiene las ecuaciones antes descritas en el apartado 3.4.

Se analizaron los escenarios A, B, C y D. Cabe mencionar que para el escenario D no existe una solución factible con los parámetros establecidos en esta formulación de optimización ya que para la demanda que se requiere en dicho escenario las plantas de producción de energía no son suficientes, por lo cual sería necesario un número mayor de plantas. Por lo dicho anteriormente, se analizarán los escenarios A, B y C, en los cuales se tienen soluciones numéricas, estimadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Costo anual total

Escenarios	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
A	16,180.000
B	158.220
C	11,050.000
D	solución infactible

CAPÍTULO IV

En la Figura 8 se visualiza la manera en la que la demanda de energía impacta al costo anual total de producción energética, se muestra que el escenario A es el más costoso con 16,180,000,000.00 dls/año mientras que el escenario B es el menos costoso con 158,220,000.00 dls/año, sin dejar a un lado el escenario C con 11,050,000,000.00 dls/año, el cual es un escenario que cuenta con un costo promedio de los escenarios propuestos.

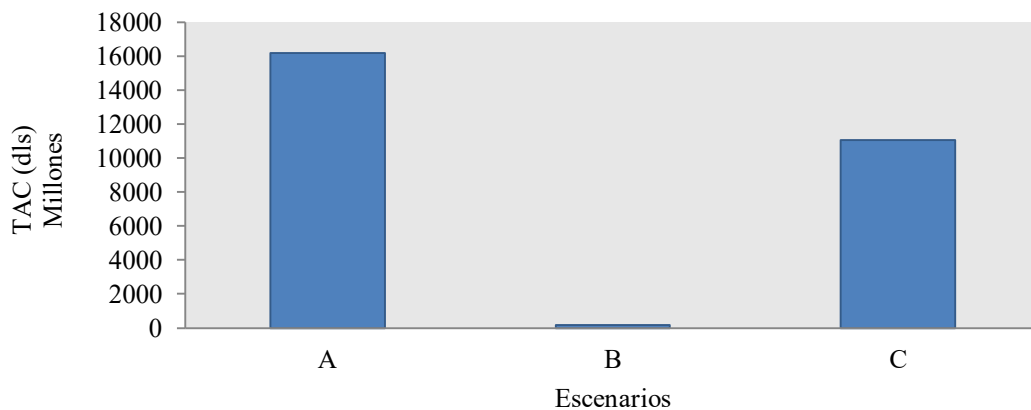


Figura 8. Costo anual total para solución de escenarios

Una parte importante es la instalación de plantas nuevas, las cuales dependerán de la capacidad con la que cuentan y la demanda requerida en cada uno de los escenarios, en la Tabla 3 se muestran las plantas elegidas de acuerdo a su tipo de tecnología para cada uno de los escenarios, el tipo de planta nueva a instalar depende directamente de la demanda energética a satisfacer es por ello que se ejecuta el código GAMS®, con la variable TAC a optimizar, con lo cual se obtiene la siguiente relación de centrales nuevas a instalar, las cuales son el arreglo óptimo para satisfacer la demanda energética y a su vez disminuir el costo anual total para cada escenario planteado.

CAPÍTULO IV

Tabla 3. Instalación de plantas nuevas por tipo de tecnología

Instalación de plantas nuevas			
<i>Tecnología</i>	<i>Escenario A</i>	<i>Escenario B</i>	<i>Escenario C</i>
Ciclo combinado	●	●	●
Termoelectrica convencional			
Carboelectrica	●		
Turbogas	●	●	●
Combustion interna			
Hidroelectrica			
Eolica	●		●
Geotermica	●		
Solar fotovoltaica	●		●
Termosolar			

Como se muestra, en el escenario A, éste es en el cual se hace uso de una mayor variedad de tipos de tecnologías convencionales y limpias, en el escenario B solo se activan centrales de dos tipos (ciclo combinado y turbogas), las cuales deben satisfacer la demanda energética total que se desea, sin embargo solo son plantas convencionales las cuales aumentaran la cantidad de emisiones. En el escenario C se activan centrales convencionales y limpias lo cual puede resultar un equilibrio para que se minimicen las emisiones al implementar tecnologías limpias.

4.4. Aspectos ambientales

Por otro lado, la parte ambiental es un factor al que se le debe prestar gran importancia por lo cual se realizó el análisis a la producción de emisiones clasificándolas en emisiones de bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y emisiones de partículas, las cuales se encuentran ligadas a la cantidad de producción de energía eléctrica requerida en México. Es importante mencionar que las emisiones que se producen son la consecuencia de la quema de combustible en las plantas convencionales.

Para obtener la cantidad de emisiones producidas para cierta cantidad de energía eléctrica, se hace uso del código GAMS®, en el cual, para este caso, se ejecuta minimizando el TAC, con lo que se genera la siguiente tabla de resultados:

CAPÍTULO IV

Tabla 4. Emisiones

Escenarios	EMISSCO ₂ (kg x 10 ⁻⁶)	EMISSNO _x (kg x 10 ⁻⁶)
A	3,264,000.00	12,600.00
B	2,544,000.00	10,560.00
C	2,902,000.00	10,620.00
D	solución infactible	solución infactible

Escenarios	EMISSO ₂ (kg x 10 ⁻⁶)	EMISSPART (kg x 10 ⁻⁶)
A	8,453.30	754.53
B	14,680.00	990.65
C	4,864.80	462.15
D	solución infactible	solución infactible

En la Figura 9 se muestra la producción de emisiones con lo cual es notable que el escenario A es el más contaminante a diferencia del B que es el menos contaminante, esto está directamente relacionado con la demanda energética.

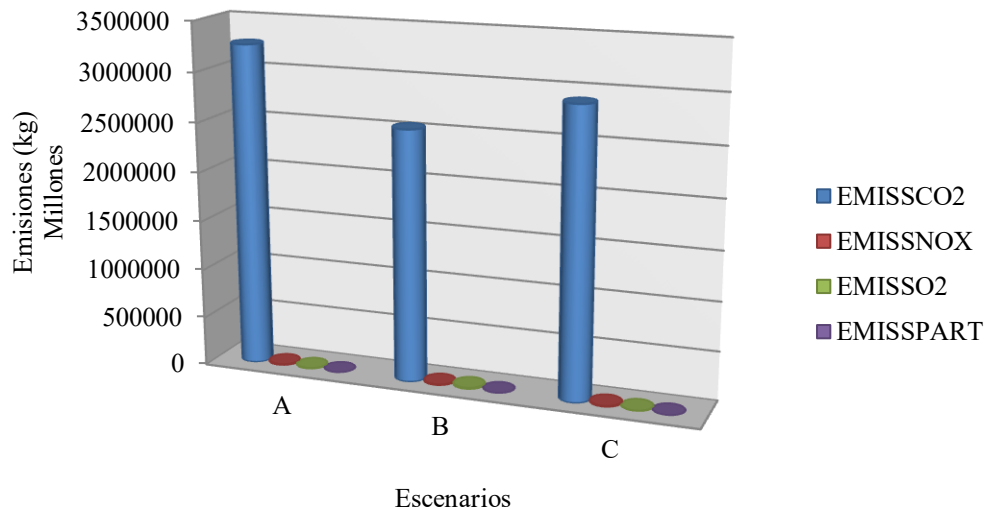


Figura 9. Emisiones emitidas por clasificación para la solución de los casos de estudio

Para determinar la cantidad de emisiones totales se consideran todas las clasificaciones, incluyendo las emisiones causadas por el bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y emisiones de partículas, en seguida se muestran las estimaciones obtenidas de forma gráfica y numérica.

CAPÍTULO IV

Tabla 5. Emisiones totales

Escenarios	EMISSTOTALES (kg x 10 ⁻⁶)
A	3,285,807.83
B	2,570,230.65
C	2,917,946.95
D	solución infactible

En la Figura 10 se resumen las emisiones, contemplándolas como totales, con lo cual es evidente que el escenario A produce una cantidad mayor de emisiones con 3, 285, 807, 830,000.0 kg /año por lo que es el más contaminante, contrario del escenario B que es menos contaminante. La diferencia es notable con una cantidad de 715, 577, 180,000.0 kg/año que a gran escala es una cantidad que puede hacer la diferencia en el medio ambiente.

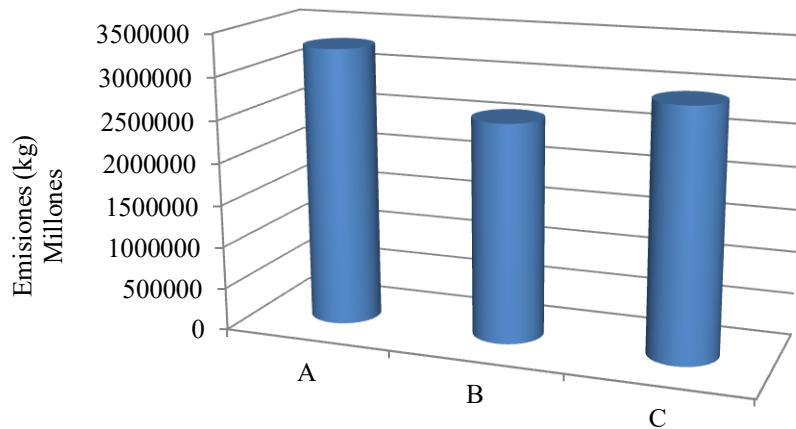


Figura 10. Emisiones emitidas totales para la solución de los casos de estudio

4.5. Minimización de emisiones

Con el software GAMS® se ejecutó un análisis a profundidad a cerca de los contaminantes emitidos a la atmosfera a causa de las plantas que imparten energía eléctrica de forma convencional. Para ello las variables a optimizar fueron las emisiones, se trabajó con el modelo matemático para cada clasificación de emisiones.

CAPÍTULO IV

Se obtuvieron tablas las cuales especifican los límites para cada clasificación, comenzando por el límite superior el cual es la cantidad de emisiones que resultaron al ejecutar el código y se mostraron anteriormente en la Tabla 4, en el que la variable a optimizar fue TAC, al mencionar límites se hace referencia a la cantidad de emisiones máximas que se obtienen al minimizar TAC y la cantidad de emisiones mínimas que se producen para satisfacer la cantidad de demanda requerida.

Para obtener el límite inferior se cambió la variable a optimizar por las emisiones, posteriormente se utilizaron distintos puntos entre los límites superior e inferior y se calculó el TAC para cada uno de los puntos antes especificados, esto con el fin de construir diagramas de Pareto, y con ello visualizar las regiones factibles e infactibles.

Cabe resaltar que el combustible utilizado en las plantas convencionales, para los casos a estudiar es el gas natural a excepción de las carboeléctricas.

En seguida se abunda acerca de lo anterior, se muestran los datos obtenidos para cada escenario y diagramas de Pareto para cada clasificación de emisiones, así como para cada escenario.

CAPÍTULO IV

ESCENARIO A

Tabla 6. Emisiones máximas y mínimas de bióxido de carbono escenario A

EMI _{SCO₂} (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
3,264,000	16,180
3,152,000	16,180
3,040,000	16,180
2,928,000	16,180
2,816,000	16,180
2,704,000	16,180
2,592,000	16,210
2,480,000	16,640
2,369,000	84,240,000

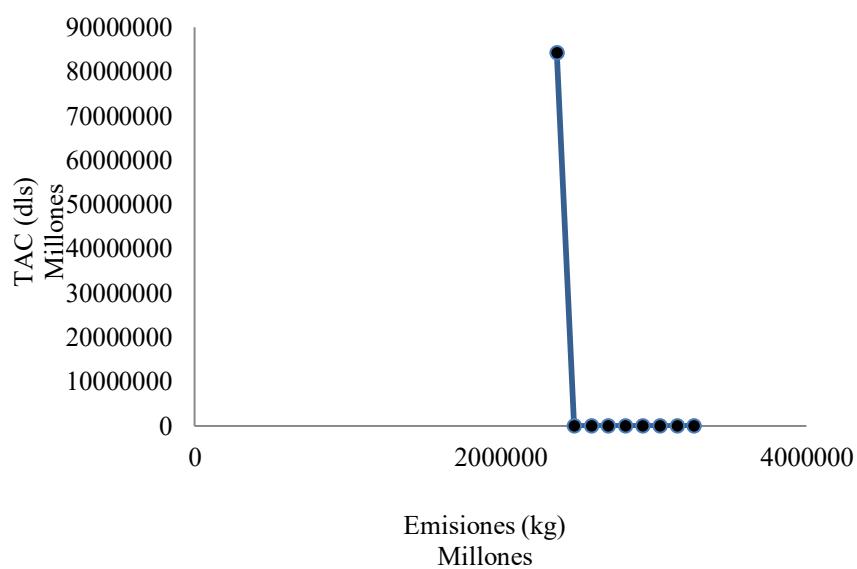


Figura 11. Diagrama de Pareto de bióxido de carbono escenario A

CAPÍTULO IV

Tabla 7. Emisiones máximas y mínimas de óxidos de nitrógeno escenario A

EMISSIONO _x (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
12,600	16,180
12,020	16,180
11,450	16,180
10,870	16,180
10,300	16,180
9,729	16,180
9,155	16,240
8,581	16,750
8,007	84,240,000

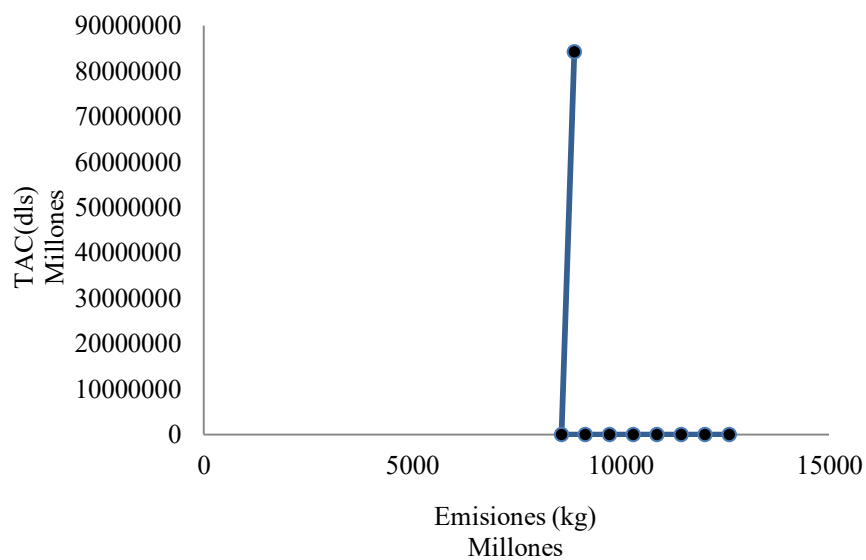


Figura 12. Diagrama de Pareto de óxidos de nitrógeno escenario A

CAPÍTULO IV

Tabla 8. Emisiones máximas y mínimas de dióxido de azufre escenario A

EMISSO ₂ (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
8,453	16,180
7,668	16,180
6,883	16,180
6,099	16,180
5,314	16,180
4,529	16,180
3,744	16,180
2,960	17,270
2,175	84,240,000

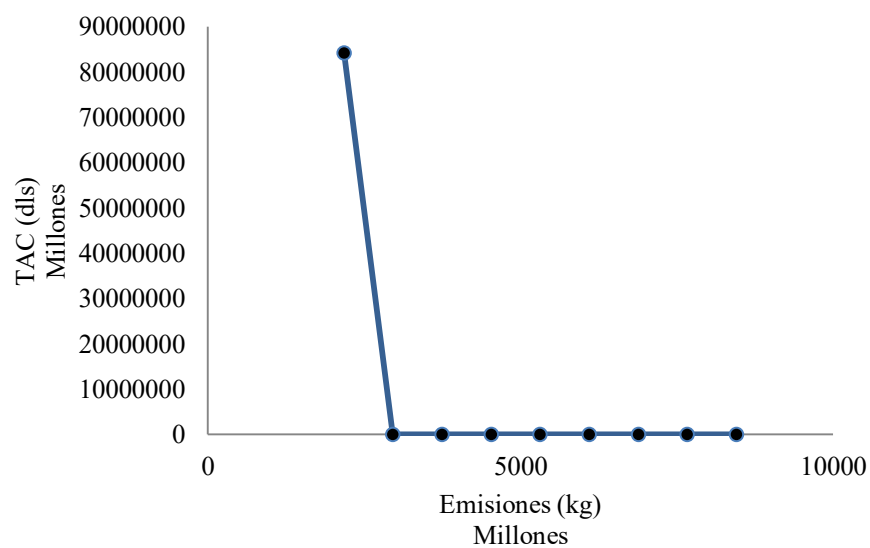


Figura 13. Diagrama de Pareto de dióxido de azufre escenario A

CAPÍTULO IV

Tabla 9. Emisiones máximas y mínimas de partículas escenario A

EMISSIONS (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
754.53	16,180
693.47	16,180
632.42	16,180
571.36	16,180
510.31	16,180
449.25	16,180
388.20	16,180
327.14	16,730
266.09	84,240,000

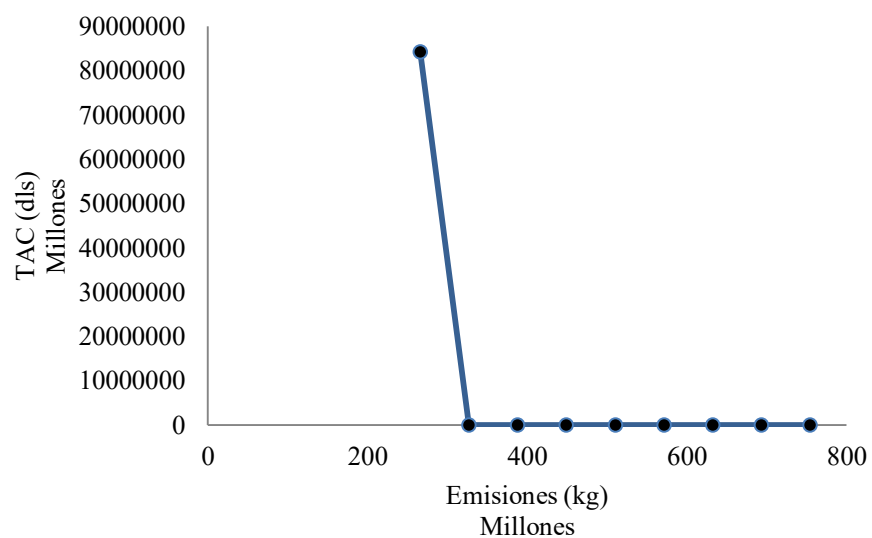


Figura 14. Diagrama de Pareto de partículas escenario A

CAPÍTULO IV

ESCENARIO B

Tabla 10. Emisiones máximas y mínimas de bióxido de carbono escenario B

EMI _{SCO₂} (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
2,544,000	158.2
2,423,000	724.3
2,302,000	1632
2,181,000	2556
2,060,000	3479
1,939,000	4560
1,818,000	6022
1,697,000	7589
1,577,000	84,240,000

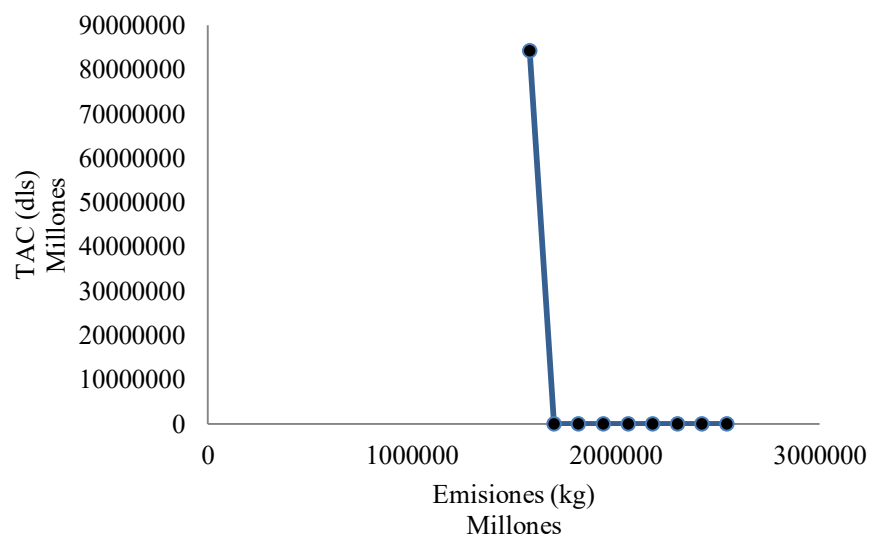


Figura 15. Diagrama de Pareto de bióxido de carbono escenario B

CAPÍTULO IV

Tabla 11. Emisiones máximas y mínimas de óxidos de nitrógeno escenario B

EMISSIONO _x (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
10,560	158.2
9,903	368.4
9,246	580.6
8,589	846.8
7,933	1,691
7,276	2,537
6,619	3,383
5,962	5,444
5,306	84,240,000

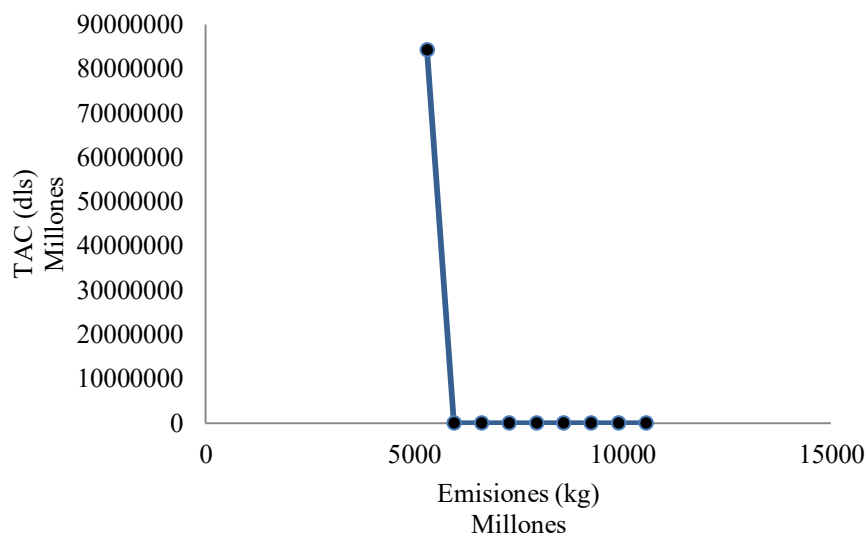


Figura 16. Diagrama de Pareto de óxidos de nitrógeno escenario B

CAPÍTULO IV

Tabla 12. Emisiones máximas y mínimas de dióxido de azufre escenario B

EMISSO ₂ (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
14,680	158.2
12,920	610.5
11,160	1,108
9,407	1,622
7,650	2,138
5,892	2,654
4,135	3,170
2,378	3,686
620.2	84,240,000

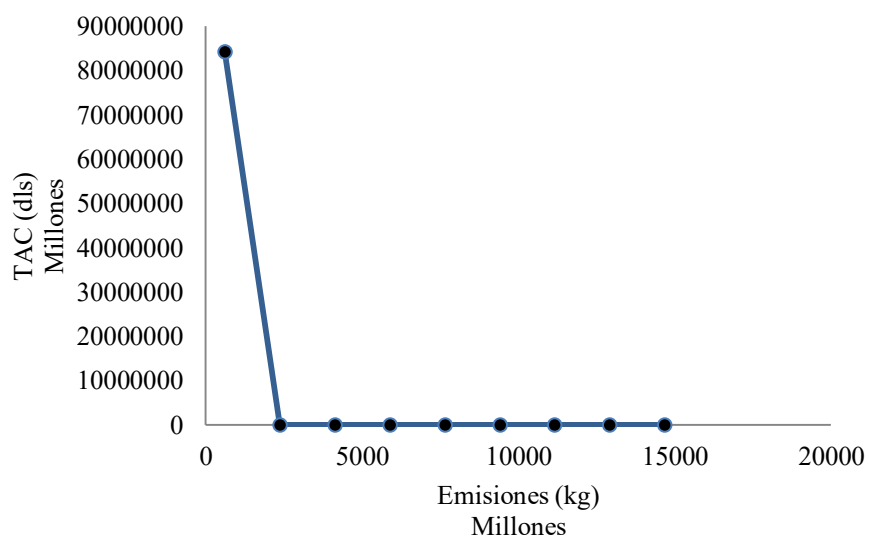


Figura 17. Diagrama de Pareto de dióxido de azufre escenario B

CAPÍTULO IV

Tabla 13. Emisiones máximas y mínimas de partículas escenario B

EMISSIONS (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
990.6	158.2
881.8	654.7
773.0	1,157
664.2	1,664
555.4	2,171
446.6	2,679
337.8	3,302
229.1	4,638
120.3	84,240,000

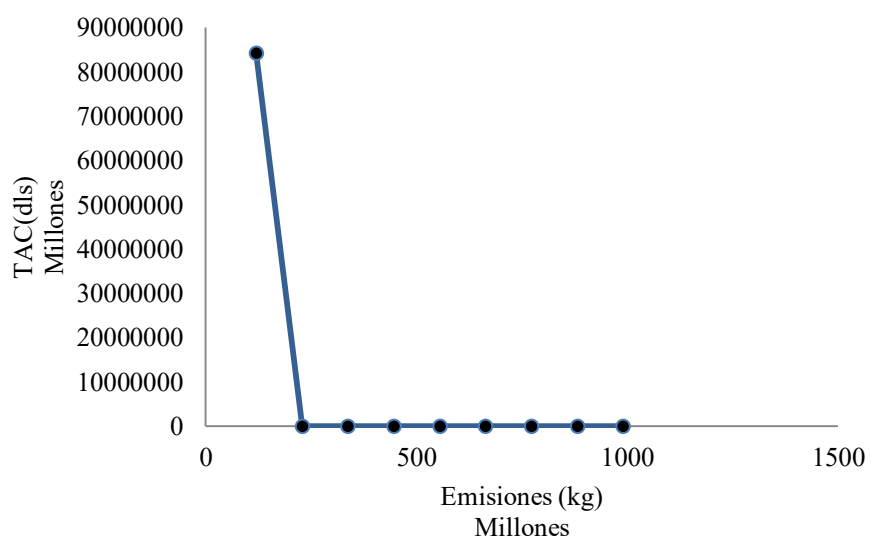


Figura 18. Diagrama de Pareto de partículas escenario B

CAPÍTULO IV

ESCENARIO C

Tabla 14. Emisiones máximas y mínimas de bióxido de carbono escenario C

EMI _{SCO₂} (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
2,902,000	11,050
2,778,000	11,050
2,654,000	11,050
2,531,000	11,050
2,407,000	11,050
2,283,000	11,410
2,160,000	11,990
2,036,000	13,040
1,913,000	84,240,000

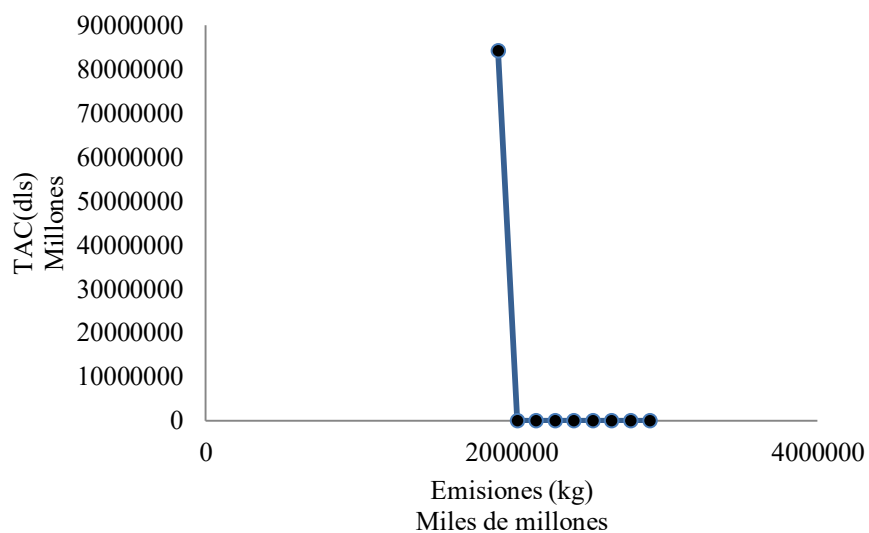


Figura 19. Diagrama de Pareto de bióxido de carbono escenario C

CAPÍTULO IV

Tabla 15. Emisiones máximas y mínimas de óxidos de nitrógeno escenario C

EMISSIONO _x (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
10,620	11,050
10,090	11,050
9,577	11,050
9,055	11,050
8,534	11,050
8,012	11,360
7,491	12,050
6,970	13,280
6,448	84,240,000

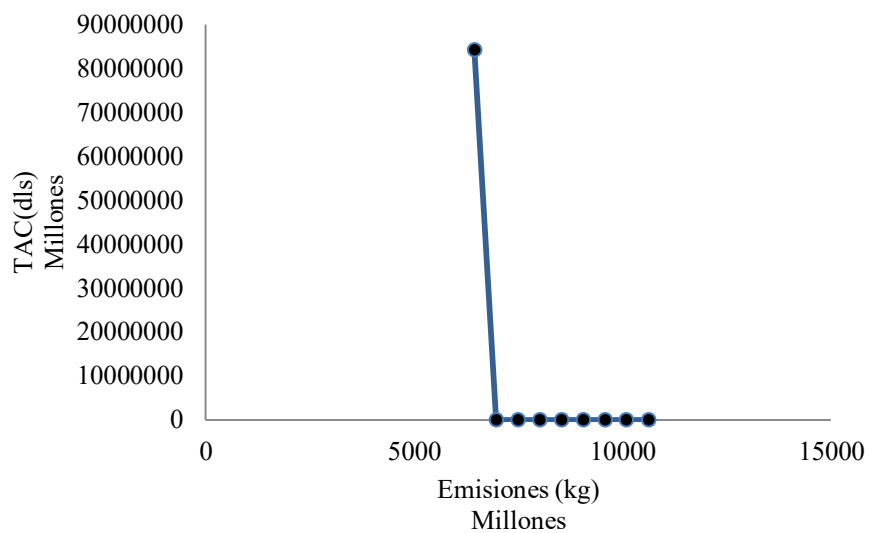


Figura 20. Diagrama de Pareto de óxidos de nitrógeno escenario C

CAPÍTULO IV

Tabla 16. Emisiones máximas y mínimas de dióxido de azufre escenario C

EMISSO ₂ (kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
4,864	11,050
4,366	11,050
3,868	11,050
3,370	11,050
2,872	11,050
2,374	11,680
1,876	12,740
1,379	14,640
881	842,400,000

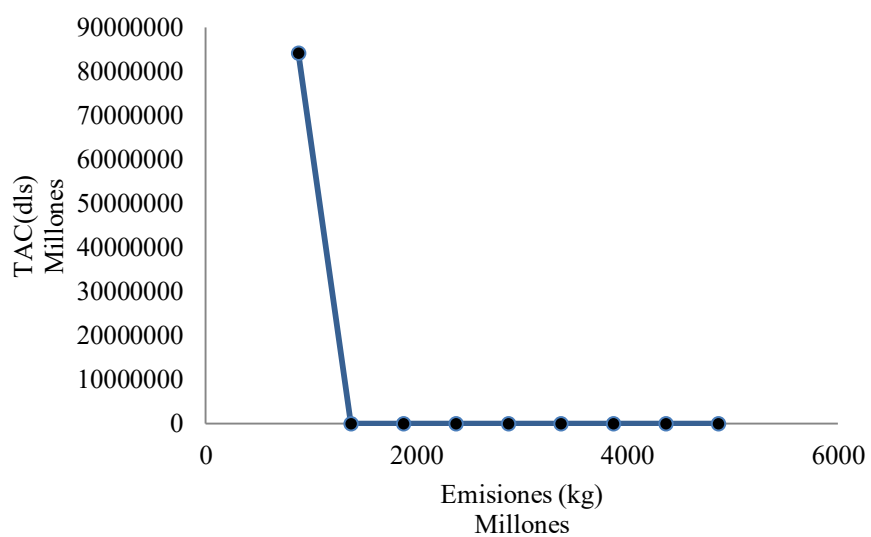


Figura 21. Diagrama de Pareto de dióxido de azufre escenario C

CAPÍTULO IV

Tabla 17. Emisiones máximas y mínimas de partículas escenario C

EMISSION(kg x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
462.1	11,050
423.8	11,050
385.6	11,050
347.3	11,050
309.0	11,050
270.7	11,380
232.5	12,660
194.2	14,390
155.9	84,240,000

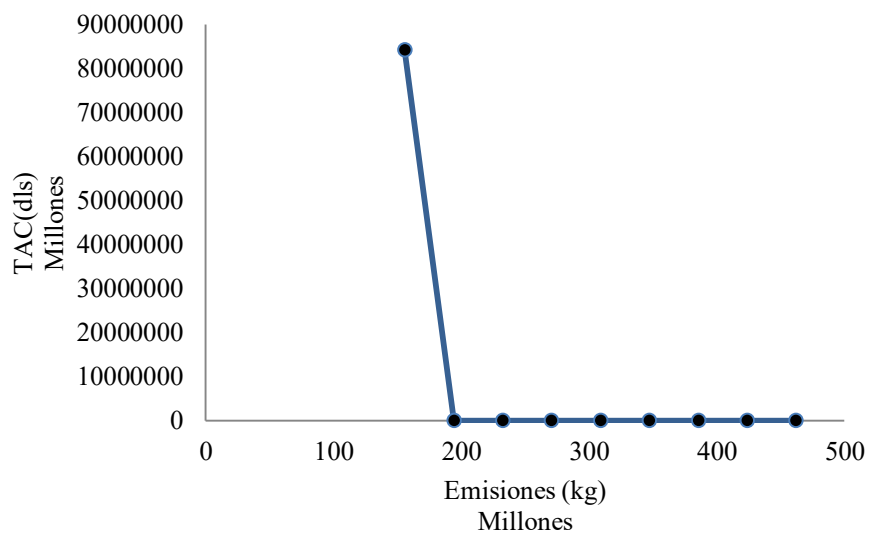


Figura 22. Diagrama de Pareto de partículas escenario C

CAPÍTULO IV

4.6. Límites máximos y mínimos de emisiones

Realizando la minimización de emisiones para los escenarios antes ilustrados se obtuvieron las emisiones mínimas requeridas para satisfacer la demanda energética planteada. Anteriormente, al minimizar TAC se encontraron los valores de emisiones para satisfacer el costo, con ello se tiene una estimación de las emisiones máximas y mínimas para cada escenario, es por ello que se procede a analizar los valores obtenidos para estimar el tipo de emisión más satisfactorio y en el cual se encuentra el menor impacto ambiental.

A continuación se expresan las cantidades de emisiones no generadas, considerando la diferencia entre las emisiones reales generadas al minimizar TAC y las emisiones mínimas que se pueden obtener.

Tabla 18. Emisiones no generadas escenario A

ESCENARIO A	
ESPECIE	EMISIONES (kg x 10 ⁻⁶)
EMISSCO ₂	895,000.00
EMISSNO _X	4,592.70
EMISSSO ₂	6,278.00
EMISSPART	488.44

Tabla 19. Emisiones no generadas escenario B

ESCENARIO B	
ESPECIE	EMISIONES (kg x 10 ⁻⁶)
EMISSCO ₂	967,000.00
EMISSNO _X	5,253.90
EMISSSO ₂	14,059.79
EMISSPART	870.34

Tabla 20. Emisiones no generadas escenario C

ESCENARIO C	
ESPECIE	EMISIONES (kg x 10 ⁻⁶)
EMISSCO ₂	989,000.00
EMISSNO _X	4,171.30
EMISSSO ₂	3,983.74
EMISSPART	306.19

4.7. Consumo de agua

Al generar energía eléctrica se tienen distintos gastos de recursos naturales, la problemática es que algunas categorías no solo requieren combustible, sino también agua que se toma de ríos, lagos y en algunos casos es tratada para evitar incrustaciones o eficiencias menores del proceso, como es el caso de las termoeléctricas y generadoras de ciclo combinado, en consecuencia de lo anterior se tiene un impacto ambiental ya que en algunos casos el agua utilizada no es recirculada en su totalidad y de una u otra forma no es recuperada al cien por ciento e incluso se regresa a los lagos contaminada.

Cabe resaltar que el uso de agua se lleva de la siguiente manera: las centrales térmicas utilizan vapor a alta temperatura para mover las turbinas, que convierten la energía térmica en electricidad. En el proceso, la temperatura del vapor cae, por lo que ya no se puede usar eficientemente para mover la turbina nuevamente. Para elevar nuevamente su temperatura, el vapor primero debe condensarse en agua líquida, por lo que la condensación se logra mediante el uso de agua de enfriamiento extraída de ríos, lagos o mares, que luego se vuelca a una temperatura segura para la vida silvestre en esas aguas.

Por lo anterior, en este trabajo de investigación se pretende obtener la cantidad de agua que deberá ser utilizada para cada caso en particular, tomando en consideración el tipo de planta productora, así como la potencia total generada.

Para obtener la cantidad de agua requerida para cierta cantidad de energía eléctrica, se hace uso del código GAMS®, el cual, para este caso, se ejecuta minimizando el TAC, con lo que se genera la siguiente tabla de resultados:

Tabla 21. Consumo de agua

Escenarios	Agua ($\text{ft}^3 \times 10^{-6}$)
A	324,700.00
B	238,200.00
C	258,700.00
D	solución infactible

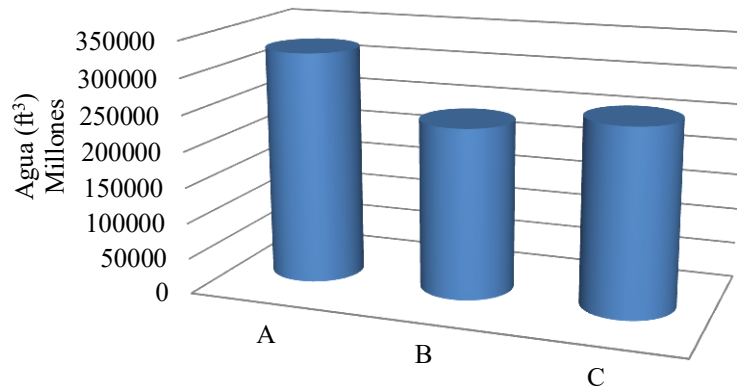


Figura 23. Consumo de agua para solución de escenarios

En la Figura 23 se visualiza el consumo total de agua para los distintos escenarios analizados, se muestra que el escenario A es aquel que consume mayor cantidad de agua con 324, 700, 000,000.00 ft³/año mientras que el escenario B es el que menos consumo de agua tiene con 238,200,000,000.00 ft³/año, sin dejar a un lado el escenario C con 258,700,000,000.00 ft³/año, el cual es un escenario que cuenta con un costo promedio de los escenarios propuestos.

4.8. Minimización de consumo de agua

Como ya se mencionó en el punto 4.7, los datos obtenidos de consumo de agua dependen directamente de la cantidad de energía eléctrica que se desea generar así como del tipo de central eléctrica con el que se trabaja, posteriormente se ejecuta con el software GAMS® un análisis a profundidad a cerca de la cantidad de agua utilizada para cierta demanda energética, para ello la variables a optimizar fue *water*, esto con la finalidad de encontrar la mínima cantidad de agua requerida para cierta energía eléctrica considerando el TAC. Se obtuvieron tablas las cuales especifican los límites, comenzando por el límite superior el cual es la cantidad de agua usada que resulta al ejecutar el código y se mostraron anteriormente en la Tabla 21, en el que la variable a optimizar fue TAC, al mencionar límites se hace referencia a la cantidad de agua máxima que se obtiene al minimizar TAC y la cantidad de agua mínima que se consume para satisfacer la cantidad de demanda requerida.

CAPÍTULO IV

Para obtener el límite inferior se cambió la variable a optimizar por la variable *water*, posteriormente se utilizaron distintos puntos entre los límites superior e inferior y se calcula el TAC para cada uno de los puntos antes especificados, esto con el fin de construir diagramas de Pareto, y con ello visualizar las regiones factibles e infactibles. A continuación se muestra lo antes mencionado con los datos obtenidos para cada escenario y sus respectivos diagramas de Pareto.

ESCENARIO A

Tabla 22. Consumo de agua máximo y mínimo escenario A

AGUA(ft ³ x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
324,700	16,180
309,300	16,180
294,000	16,180
278,700	16,180
263,400	16,180
248,100	16,180
232,800	16,180
217,500	16,560
202,200	84,240,000

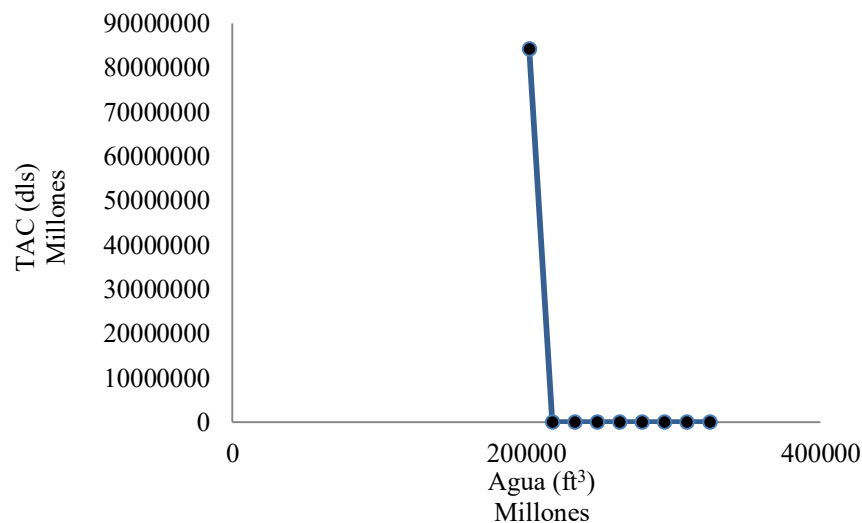


Figura 24. Diagrama de Pareto de consumo de agua escenario A

CAPÍTULO IV

ESCENARIO B

Tabla 23. Consumo de agua máximo y mínimo escenario B

AGUA(ft ³ x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
238,200	158.20
225,700	495.50
213,200	848.60
200,700	1,296.00
188,200	1,756.00
175,700	2,232.00
163,200	3,015.00
150,700	5,248.00
138,200	84,240,000.00

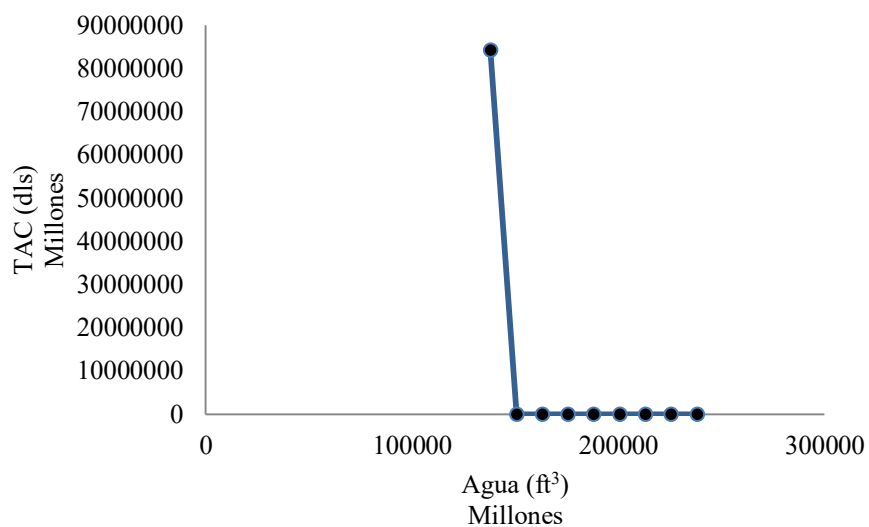


Figura 25. Diagrama de Pareto de consumo de agua escenario B

CAPÍTULO IV

ESCENARIO C

Tabla 24. Consumo de agua máximo y mínimo escenario C

AGUA(ft ³ x 10 ⁻⁶)	TAC (dls x 10 ⁻⁶)
258,700	11,050
247,000	11,050
235,400	11,050
223,800	11,050
212,200	11,050
200,600	11,270
189,000	11,770
177,400	12,920
165,800	84,240,000

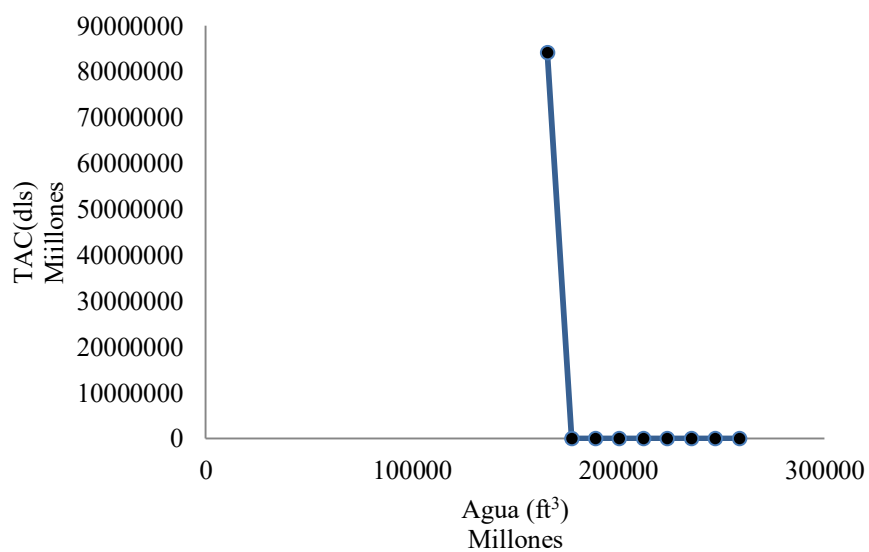


Figura 26. Diagrama de Pareto de consumo de agua escenario C

4.9. Límites máximos y mínimos de consumo de agua

Realizando la minimización de agua requerida para los escenarios antes ilustrados se obtuvo el consumo de agua mínimo requerido para satisfacer la demanda energética planteada. Anteriormente, al minimizar TAC se encontraron los valores de ft^3 de agua para satisfacer el costo, con ello se tiene una estimación de consumo máximo y mínimo para cada escenario, es por ello que se procede a analizar los valores obtenidos para estimar el escenario más satisfactorio y en el cual se encuentra el mayor ahorro de agua.

A continuación, se expresan la cantidad de agua no consumida, considerando la diferencia entre consumo real generado al minimizar TAC y el mínimo que se pueden obtener.

Tabla 25. Agua no consumida

Escenarios	Agua ($\text{ft}^3 \times 10^{-6}$)
A	122,500
B	100,000
C	92,900
D	solución infactible

4.10. Discusión y análisis

- Uno de los puntos más importantes de esta optimización es que se identificó el tipo de tecnología que se debe activar para satisfacer la demanda energética que se requiere en cada caso.
- En los diagramas de Pareto de emisiones, se visualiza que para reducir las emisiones el costo aumenta, es decir las emisiones son inversamente proporcionales al TAC.
- En los diagramas de Pareto de consumo de agua, se visualiza que para reducir los ft^3 de agua el costo aumenta, es decir el consumo de agua es inversamente proporcionales al TAC.
- Se logró plasmar un ahorro de emisiones y agua requerida para los distintos escenarios, esto comparando límites máximos y mínimos.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

El modelo consideró aspectos económicos dentro de los cuales destaca el costo anual total requerido para satisfacer cierta demanda energética.

Dentro de los aspectos ambientales se realizó un análisis a profundidad acerca de las emisiones producidas en plantas convencionales a causa de combustibles fósiles y la cantidad de agua que se consume para la producción de energía.

Basando esta investigación en los resultados obtenidos y reportados en el capítulo IV y de acuerdo al código desarrollado en GAMS®, se recapitula lo siguiente:

- a) En el aspecto económico el escenario factible es el B, ya que es el menos costoso con 158, 220,000 dls/año.
- b) Para lograr que el escenario B se lleve a cabo, se debe considerar una demanda energética prácticamente constante, la población crece año con año, sin embargo si el consumo de energía se reduce se puede generar un equilibrio.
- c) En el aspecto ambiental refiriendo a las emisiones, el escenario B sigue siendo factible, con 2, 570, 230, 650,000 kg/año.
- d) Resaltando el consumo de agua, el escenario B de nueva cuenta es el más factible con 238,200,000,000 ft³/año
- e) El escenario B es factible en los dos aspectos ya que a mayor demanda energética, se requiere menos producción de energía eléctrica, cantidad de combustible y por ende menores emisiones contaminantes y menor consumo de agua.

Se cumplieron los objetivos planteados en este trabajo de investigación, se desarrolló un modelo matemático de optimización sobre la planificación estratégica para la generación de energía eléctrica en sus diferentes formas de producción: convencional y limpia. Por lo que cabe resaltar que la hipótesis se acepta.

Generalizando, el modelo matemático planteado en esta investigación es útil ya que se pueden realizar predicciones acerca de costos e impacto ambiental, sin antes tener la necesidad de implementación en forma real lo que conllevaría numerosas pérdidas económicas.

REFERENCIAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SENER. (2018). *PRODESEN (programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional)*. Recuperado el 20 de julio de 2019, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>
- [2] CENACE (*Centro nacional de control de energía*). (2017). Recuperado el 15 de agosto del 2019, de <https://www.cenace.gob.mx>
- [3] PEMEX (*petróleos Mexicanos*). (2017). Recuperado el 5 de junio de 2019, de https://www.pemex.com/saladeprensa/boletines_nacionales/Paginas/2017-043-nacional.aspx
- [4] SE (*secretaría de economía*). (2014). Recuperado el 20 de Julio de 2019, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5557/pm_grafito_2014.pdf
- [5] Leonardo de Jesús Ramos-Gutiérrez, Manuel Montenegro-Fragoso. La generación de energía eléctrica en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. (2012) III(4).
- [6] Ramón González-Bravo, Jürgen Mahlknecht, Jose Maria Ponce-Ortega. Water, food and power grid optimization at macroscopic level involving multi-stakeholder approach. *Energy Procedia* 153(2018) 347–352
- [7] Sergio Iván Martínez-Guido, Inés María Ríos-Badrán, Claudia Gutiérrez-Antonio, José María Ponce-Ortega. Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable Energy* 130 (2019) 622-632.
- [8] Aurora de Fátima Sánchez-Bautista, José Ezequiel Santibañez-Aguilar, Luis Fabián Fuentes-Cortés, Antonio Flores-Tlacuahuac, José María Ponce-Ortega. A multistakeholder approach for the optimal planning of sustainable energy systems. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (2018) 6(7) 9451-9460.
- [9] Arredondo-Ramírez, K., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M. (2016). Optimal planning and infrastructure development for shale gas production. *Energy Conversion and Management*. 119:91-100.
- [10] Blunt M, Fayers FJ, Orr FM (1993) Carbon Dioxide in Enhanced Oil Recovery. *Energy Conversion and Management* 34: 1197-1204.

REFERENCIAS

- [11] Muggeridge A, Cockin A, Webb K, Frampton H, Collins I, Moulds T, Salino P (2014) Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits. *The royal society publishing* 372: 20120320.
- [12] Patel J, Borgohain S, Kumar M, Rangarajan V, Somasundaran P, Sen R (2015) Recent developments in microbial enhanced oil recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52: 1539-1558.
- [13] Nielsen SM, Nesterov I, Shapiro AA (2016) Microbial enhanced oil recovery – a modeling study of the potential of spore-forming bacteria. *Computational Geosciences* 20(3): 567-580.

ANEXOS

ANEXOS

Código GAMS®

\$TITULO MODELO DE PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

SETS

E	UNIDADES EXISTENTES	/1*10/
ENC(E)	SUBSET PLANTAS EXISTENTES CONVENCIONALES	/1*5/
EC(E)	SUBSET PLANTAS EXISTENTES LIMPIAS	/6*10/
N	UNIDADES NUEVAS	/1*10/
NNC(N)	SUBSET PLANTAS NUEVAS CONVENCIONALES	/1*5/
NC(N)	SUBSET PLANTAS NUEVAS LIMPIAS	/6*10/
T	PERIODO	/1*11/
;		

\$ONTEXT

*T PERIOD (2020-2030)

1 2020

2 2021

3 2022

.

.

11 2030

*E TECNOLOGIAS EXISTENTES

1	CICLO COMBINADO
2	TERMoeLECTRICA CONVENCIONAL
3	CARBOELECTRICA
4	TURBOGAS
5	COMBUSTION INTERNA
6	HIDROELECTRICA
7	EOLICA
8	GEOTERMICA
9	SOLAR FOTOVOLTAICA
10	TERMOSOLAR

*N TECNOLOGIAS NUEVAS

1	CICLO COMBINADO
2	TERMoeLECTRICA CONVENCIONAL
3	CARBOELECTRICA
4	TURBOGAS
5	COMBUSTION INTERNA
6	HIDROELECTRICA
7	EOLICA
8	GEOTERMICA
9	SOLAR FOTOVOLTAICA
10	TERMOSOLAR

*ENC TECNOLOGIAS EXISTENTES CONVENCIONALES

1	CICLO COMBINADO
2	TERMoeLECTRICA CONVENCIONAL
3	CARBOELECTRICA

ANEXOS

4 TURBOGAS
5 COMBUSTION INTERNA

*NNC TECNOLOGIAS NUEVAS CONVENCIONALES
1 CICLO COMBINADO
2 TERMoeLECTRICA CONVENCIONAL
3 CARBOELECTRICA
4 TURBOGAS
5 COMBUSTION INTERNA

*NC TECNOLOGIAS NUEVAS LIMPIAS
6 HIDROELECTRICA
7 EOLICA
8 GEOTERMICA
9 SOLAR FOTOVOLTAICA
10 TERMOSOLAR

*EC TECNOLOGIAS EXISTENTES LIMPIAS
6 HIDROELECTRICA
7 EOLICA
8 GEOTERMICA
9 SOLAR FOTOVOLTAICA
10 TERMOSOLAR

*\$ DOLARES

\$OFFTEXT

BINARY VARIABLES

YNEW(N) VARIABLE BINARIA PARA PLANTAS NUEVAS;

VARIABLES POSITIVAS

PEXISTENC(ENC,T) POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS EXISTENTES
CONVENCIONALES EN PERIODO T
FEXIST(ENC,T) COMBUSTIBLE EN PLANTAS EXISTENTES CONVENCIONALES EN
PERIODO T
PEXIST(E,T) POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS EXISTENTES EN PERIODO T
COYMEXIST COSTO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO EN PLANTAS
EXISTENTES
PNEW(N,T) POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS NUEVAS EN PERIODO T
PNEWNNC(NNC,T) POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS NUEVAS EN PERIODO T
FNEW(NNC,T) COMBUSTIBLE EN PLANTAS NUEVAS CONVENCIONALES EN
PERIODO T
CAPNEW(N) CAPACIDAD INSTALADA EN PLANTAS NUEVAS
COYMNEW COSTO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO EN PLANTAS NUEVAS
CINVNEW(N) COSTO DE INVERSION EN PLANTAS NUEVAS
(\$)
PEXISTEC(EC,T) POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS EXISTENTES LIMPIAS EN
PERIODO T
PNEWNC(NC,T) POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS NUEVAS LIMPIAS EN
PERIODO T
;

ANEXOS

VARIABLE	
TAC	COSTO ANUAL TOTAL
EMISSCO2	EMISIONES PRODUCIDAS DE CO2
EMISSNOX	EMISIONES PRRODUCIDAS DE NOX
EMISSSO2	EMISIONES PRRODUCIDAS SO2
EMISSPART	EMISIONES PRRODUCIDAS DE PARTICULAS
WATER	CONSUMO DE AGUA
;	
TABLE ALFAEXIST(ENC,T)	FACTOR DE COMBUSTIBLE EN PLANTAS
EXISTENTES CONVENCIONALES	
;	
TABLE CAPEXIST(E,T)	CAPACIDAD INSTALADA EN PLANTAS
EXISTENTES	
;	
TABLE BETAEXIST(E,T)	COSTO POR UNIDAD DE ENERGIA EN PLANTAS
EXISTENTES	
;	
TABLE ALFANEW(NNC,T)	FACTOR DE COMBUSTIBLE EN PLANTAS
EXISTENTES CONVENCIONALES	
;	
TABLE BETANEW(N,T)	COSTO POR UNIDAD DE ENERGIA EN PLANTAS
EXISTENTES	
;	
TABLE PHIEMISSEXISTCO2(ENC,T)	FACTOR DE EMISIONES EN PLANTAS
EXISTENTES DE CO2	
;	
TABLE PHIEMISSNEWCO2(NNC,T)	FACTOR DE EMISIONES EN PLANTAS NUEVAS DE
CO2	
;	
TABLE PHIEMISSEXISTNOX(ENC,T)	FACTOR DE EMISIONES EN PLANTAS
EXISTENTES DE NOX	
;	
TABLE PHIEMISSNEWNOX(NNC,T)	FACTOR DE EMISIONES EN PLANTAS NUEVAS DE
NOX	
;	
TABLE PHIEMISSEXISTSO2(ENC,T)	FACTOR DE EMISIONES EN PLANTAS
EXISTENTES DE SO2	
;	
TABLE PHIEMISSNEWSO2(NNC,T)	FACTOR DE EMISIONES EN PLANTAS NUEVAS DE
SO2	
;	

ANEXOS

TABLE PHIEMISSEXISTPART(ENC,T) EXISTENTES DE PARTICULAS ;	FACTOR DE EMISIONES EN PLANTAS
TABLE PHIEMISSNEWPART(NNC,T) PARTICULAS ;	FACTOR DE EMISIONES EN PLANTAS NUEVAS DE
TABLE DELTAWATEREXIST(E,T) EXISTENTES ;	FACTOR DE CONSUMO DE AGUA EN PLANTAS
TABLE DELTAWATERNEW(N,T) NUEVAS ;	FACTOR DE CONSUMO DE AGUA EN PLANTAS
PARAMETER R / /;	TASA DE INTERES
PARAMETER YEAR(T) / /;	RANGO DE AÑOS 2020-2030
PARAMETER GAMMANEW(N) / /;	COSTO POR UNIDAD DE ENERGIA
PARAMETER OMEGACOSINV OMEGACOSINV=1E3;	INVCOST SUPERIOR;
PARAMETER OMEGACAP OMEGACAP=1E8;	CAPACIDAD MAXIMA;
PARAMETER PDEMAND(T) / /;	DEMANDA ENERGETICA EN PERIODO T
PARAMETER PCLEAN(T) / /;	ENERGIA LIMPIA EN PERIODO T
ECUACIONES	
EQ1(ENC,T) CONVENCIONALES,	POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS EXISTENTES
EQ2(E,T) EQ3 EXISTENTES,	POTENCIA PRODUCIDA Y CAPACIDAD INTALADA EXISTENTE, COSTO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO EN PLANTAS
EQ4(N,T) EQ5(NNC,T) EQ6(N,T) EQ7(N) EQ8 EXISTENTES,	POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS NUEVAS, POTENCIA PRODUCIDA EN PLANTAS NUEVAS CONVENCIONALES, POTENCIA PRODUCIDA Y CAPACIDAD INSTALADA NUEVA, CAPACIDAD NUEVA, COSTO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO EN PLANTAS
EQ9(N) EQ10(T) EQ11(T) EQ12 EQ13	COSTO DE INVERSION EN PLANTAS NUEVAS, DEMANDA ENERGETICA, ENERGIA LIMPIA, EMISIONES DE CO2, EMISIONES DENOX,

ANEXOS

```

EQ14          EMISIONES DE SO2,
EQ15          EMISIONES DE PARTICULAS,
EQ16          AGUA,
EQ17          COSTO ANUAL TOTAL
;

*****MODEL*****
*****
EQ1 (ENC, T) ..      PEXISTENC (ENC, T) =E=FEXIST (ENC, T) *ALFAEXIST (ENC, T) ;
EQ2 (E, T) ..      PEXIST (E, T) =L=CAPEXIST (E, T) ;
EQ3 ..
COYMEXIST=E=SUM (T, (SUM (E, (BETAEXIST (E, T) *PEXIST (E, T)) / (1+R) **YEAR (T))));
EQ4 (N, T) ..      PNEW (N, T) =L=PMAX (N) *YNEW (N) ;
EQ5 (NNC, T) ..    PNEWNNC (NNC, T) =E=FNEW (NNC, T) *ALFANEW (NNC, T) ;
EQ6 (N, T) ..      PNEW (N, T) =L=CAPNEW (N) ;
EQ7 (N) ..        CAPNEW (N) =L=OMEGACAP *YNEW (N) ;
EQ8 ..
COYMNEW=E=SUM (T, (SUM (N, (BETANEW (N, T) *PNEW (N, T)) / (1+R) **YEAR (T))));

EQ9 (N) ..
CINVNEW (N) =E= (GAMMANEW (N) *CAPNEW (N) / (1+R) **CARD (T)) + (OMEGACOSINV *YNEW (N)
);

EQ10 (T) ..      PDEMAND (T) =E=SUM (E, PEXIST (E, T)) +SUM (N, PNEW (N, T)) ;
EQ11 (T) ..
PCLEAN (T) =G=SUM (EC, PEXISTEC (EC, T)) +SUM (NC, PNEWNC (NC, T)) ;

EQ12 ..
EMISSCO2=E=SUM (ENC, (SUM (T, PHIEMISSEXISTCO2 (ENC, T) *PEXIST (ENC, T))) +SUM (N
NC, (SUM (T, PHIEMISSNEWCO2 (NNC, T) *PNEW (NNC, T))));
EQ13 ..
EMISSNOX=E=SUM (ENC, (SUM (T, PHIEMISSEXISTNOX (ENC, T) *PEXIST (ENC, T))) +SUM (N
NC, (SUM (T, PHIEMISSNEWNOX (NNC, T) *PNEW (NNC, T))));
EQ14 ..
EMISSSO2=E=SUM (ENC, (SUM (T, PHIEMISSEXISTSO2 (ENC, T) *PEXIST (ENC, T))) +SUM (N
NC, (SUM (T, PHIEMISSNEWSO2 (NNC, T) *PNEW (NNC, T))));
EQ15 ..
EMISSPART=E=SUM (ENC, (SUM (T, PHIEMISSEXISTPART (ENC, T) *PEXIST (ENC, T))) +SUM
(NNC, (SUM (T, PHIEMISSNEWPART (NNC, T) *PNEW (NNC, T))));

EQ16 ..
WATER=E=SUM (E, (SUM (T, DELTAWATEREXIST (E, T) *PEXIST (E, T))) +SUM (N, (SUM (T, DE
LTAWATERNEW (N, T) *PNEW (N, T))));
EQ17 ..          TAC=E=COYMEXIST+COYMNEW+SUM (N, CINVNEW (N)) ;

MODEL ENERGY /ALL/;

SOLVE ENERGY USING MIP MINIMIZING TAC;

```