



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Impactos en la salud por la
generación de electricidad
con energía fósil en México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Eléctrica Electrónica

P R E S E N T A

Elizabeth Luna Ramírez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Pamela Fran Nelson
Edelstein



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) proyecto No. IT102621 “Modelación de la Transición Energética para evaluar los Beneficios Económicos, Ambientales y Sociales de México al 2030” por el apoyo.

A la Dra. Pamela Fran Nelson Edelstein por su apoyo y tiempo durante la realización de esta tesis.

A los integrantes del jurado por sus aportes y enseñanzas que me brindaron al ser su alumna.

DEDICATORIA

A mi madre, por el apoyo y amor de siempre.

A mis abuelos por sus cuidados y amor.

A mi hermana por ser mi compañera y amiga.

A mi tío por su apoyo y cariño brindado.

A Santiago por estar conmigo desde el inicio y ser partícipe de este logro.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| AGRADECIMIENTOS | 2 |
| DEDICATORIA | 3 |
| CAPÍTULO 1 | 12 |
| ESTADO DEL ARTE | 12 |
| CAPÍTULO 2 | 17 |
| ESCENARIO ACTUAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL..... | 17 |
| 2.1 SISTEMA ELÉCTRICO..... | 17 |
| 2.2 SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL..... | 18 |
| 2.2.1 Capacidad Instalada | 20 |
| 2.2.2 Evolución de la Capacidad Instalada | 21 |
| 2.2.3 Generación..... | 23 |
| 2.2.4 Tecnologías de generación | 24 |
| CAPÍTULO 3 | 34 |
| HISTORIA Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA..... | 34 |
| 3.1 HISTORIA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO..... | 34 |
| 3.2 TRANSICIÓN ENERGÉTICA | 38 |
| 3.3 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE | 41 |
| 3.4 TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO..... | 45 |
| 3.4.1 Antecedentes..... | 45 |
| 3.4.2 Escenario y metas actuales..... | 48 |
| CAPÍTULO 4 | 50 |
| CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS..... | 50 |
| 4.1 TIPOS DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS | 52 |
| 4.2 IMPACTOS EN LA SALUD..... | 56 |
| 4.2.1 Normatividad..... | 59 |
| 4.3 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA | 61 |
| CAPÍTULO 5 | 64 |
| METODOLOGÍA | 64 |
| 5.1 METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES..... | 64 |
| 5.2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL IMPACTO EN LA SALUD HUMANA DEBIDO A LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD | 67 |
| 5.3 BASE DE DATOS PARA LA CREACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO..... | 69 |
| 5.3.1 Impacto en la salud humana | 69 |
| 5.3.2 Modelo matemático | 73 |
| 5.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA..... | 74 |
| 5.4.1 Valor de una vida estadística..... | 74 |
| 5.4.2 Ajuste de inflación y zona geográfica | 75 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 6 | 76 |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS | 76 |
| 6.1 IMPACTO EN LA SALUD | 76 |
| 6.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS | 81 |
| 6.4 VALORACIÓN ECONÓMICA | 82 |
| 6.3 CAMBIOS EN LA MATRIZ ENERGÉTICA..... | 84 |
| CONCLUSIONES | 89 |
| REFERENCIAS..... | 92 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Sistemas eléctricos aislados, elaboración propia con datos del CENACE 2021 | 19 |
| Figura 2.2 Regiones de control del SEN, elaboración propia con datos del CENACE 2021..... | 20 |
| Figura 2.3 Porcentaje de capacidad instalada en el SEN por tecnología, elaboración propia con datos del CENACE 2021 | 21 |
| Figura 2.4 Evolución de la capacidad instalada, tecnologías con fuentes fósiles (MW), elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE) | 22 |
| Figura 2.5 Evolución de la capacidad instalada, energía limpia (MW), elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE)..... | 23 |
| Figura 2.6 Porcentaje de generación de energía por tecnología, elaboración propia con datos del CENACE 2021..... | 24 |
| Figura 2.7 Ciclo Rankine ideal..... | 26 |
| Figura 2.8 Ciclo Brayton | 28 |
| Figura 2.9 Brayton - Rankine | 29 |
| Figura 2.10 Carrera de potencia en un motor diésel de cuatro movimientos..... | 31 |
| Figura 3.1 Registro histórico de la generación de energía eléctrica en México, Ramos y Montenegro 2012 | 36 |
| Figura 3.2 Generación de energía por tipo de tecnología 1970 – 2013, elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) | 38 |
| Figura 3.3 Anomalías de temperatura superficial media mundial, Resumen técnico del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) | 40 |
| Figura 3.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible, Naciones Unidas | 42 |
| Figura 3.5 Metas de generación de energía eléctrica limpia 2018 – 2024, Ley de Transición Energética 2015 | 48 |
| Figura 3.6 Metas de generación de energía eléctrica limpia 2024 – 2050, Acuerdo 2020 | 49 |
| Figura 4.1 Emisión nacional de contaminantes por fuente, elaboración propia con datos del INEM 2016 | 52 |
| Figura 4.2 Contaminantes criterio, elaboración propia con datos de PROAIRE ZMVM 2021..... | 53 |
| Figura 4.3 Contaminantes de origen antropogénico, elaboración propia con datos del INEM 2016 | 56 |
| Figura 4.4 Principales factores de riesgo, elaboración propia con datos del IHME 2019 | 57 |
| Figura 4.5 Porcentaje de cumplimiento de NOMs en ciudades y zonas metropolitanas, elaboración propia con datos del Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019 | 61 |
| Figura 4.6 Emisiones derivadas de la generación de electricidad, elaboración propia con datos del INEM 2016 | 62 |
| Figura 5.1 Factores para modelos atmosféricos, elaboración propia con información de SEMARNAT-INE 2006..... | 67 |
| Figura 5.2 Metodología para la estimación del impacto en la salud humana a causa de la generación de electricidad | 69 |
| Figura 6.1 Estado de Coahuila, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2016 | 78 |
| Figura 6.2 Estado de México, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2016..... | 78 |
| Figura 6.3 Estado de Guerrero, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2016..... | 79 |
| Figura 6.4 Estado de Veracruz, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2016 | 79 |
| Figura 6.5 Estado de Hidalgo, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2016 | 80 |

Figura 6.6 Porcentaje de mortalidad según la tecnología a nivel nacional 80

Figura 6.7 Costo económico 84

Figura 6.8 Generación de electricidad por tipo de tecnología año 2016, elaboración propia con datos de PRODESEN 201786

Figura 6.9 Generación de electricidad por tipo de tecnología año 2017, elaboración propia con datos de PRODESEN 201886

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1 LAERFTE y LASE | 46 |
| Tabla 4.1 Óxidos de Nitrógeno, EPA 1999 | 54 |
| Tabla 4.2 Valores límites de concentraciones NOM y OMS | 60 |
| Tabla 4.3 Contaminantes atmosféricos debido a la generación de electricidad, elaboración propia con datos del Emission Inventory Improvement Program 2001 | 63 |
| Tabla 5.1 Factores de emisión, elaboración propia con información de IMCO 2018 | 71 |
| Tabla 5.2 Variables del modelo matemático | 73 |
| Tabla 6.1 Número de muertes por entidad federativa y tecnología | 77 |
| Tabla 6.2 Costo económico por entidad federativa y tecnología | 83 |
| Tabla 6.3 Factores de mortalidad | 85 |
| Tabla 6.4 Resultados 2017, impacto en la salud y valoración económica | 87 |

INTRODUCCIÓN

PROBLEMA

Existe la necesidad de reducir el impacto en la salud humana debido a la contaminación ambiental. Esta necesidad se puede adaptar al sector eléctrico, dado que hay tecnologías de generación que producen contaminantes atmosféricos dañinos.

HIPÓTESIS

La generación de energía eléctrica es contribuyente a este tipo de contaminación, por lo que es preciso estudiar el impacto que tiene esta actividad en la salud de las personas.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta tesis es cuantificar el impacto en la salud debido a la generación de electricidad con energía fósil en México, teniendo como indicador el número de muertes atribuibles a la producción de energía eléctrica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De la misma forma, se mencionan los objetivos específicos a continuación:

- Calcular el número de muertes por tipo de tecnología de generación eléctrica en las diferentes entidades federativas mediante la propuesta de un modelo matemático.
- Determinar cuáles son las entidades más afectadas por la contaminación ambiental derivada de la generación de energía eléctrica.
- Realizar una valoración económica de los daños a la salud ocasionados por las diferentes tecnologías que utilizan energía fósil para la producción de electricidad en las distintas entidades federativas de México.

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

En esta investigación se cuantificará el impacto en la salud atribuible a la generación de electricidad empleando la propuesta de un modelo matemático debido a la falta de información y

equipo de medición de emisiones atmosféricas en todas las centrales de energía fósil en México, por lo que se usará una metodología que obtiene como resultado una aproximación al impacto en la salud de manera nacional, de tal forma que no se requiere de una gran cantidad de información ni de uso de herramientas computacionales complejas.

LIMITANTES DE LA INVESTIGACIÓN

En este trabajo sólo se considerarán los daños debidos al material particulado fino emitido por plantas eléctricas, dicho de otra forma, se omiten todos los demás contaminantes que de igual manera causan un impacto negativo en la salud humana.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

CAPÍTULO 1

Estado del arte

En este capítulo se presentan algunos de los estudios que se han generado alrededor del mundo, en ellos se evalúa el impacto en la salud por los contaminantes que son emitidos a la atmósfera como consecuencia de la producción de energía eléctrica. Estos estudios utilizan diversas metodologías las cuales están acompañadas de equipo de cómputo y software especializado.

CAPÍTULO 2

Escenario actual del Sistema Eléctrico Nacional

El capítulo dos describe qué es un sistema eléctrico y detalla cómo se encuentra la matriz de generación de energía eléctrica, así como la evolución esperada de capacidad instalada en un lapso de 15 años. También se explican las principales tecnologías con las que cuenta México para la producción de electricidad separándolas por el tipo de energía que producen: fósil o limpia.

CAPÍTULO 3

Historia y transición eléctrica

En este capítulo se detalla la historia del sector eléctrico en México, los cambios que se han tenido en la matriz energética del sistema eléctrico en el tiempo, la importancia del petróleo y el

auge de las termoeléctricas convencionales. Asimismo, se explica qué es la transición energética y su importancia.

CAPÍTULO 4

Contaminantes atmosféricos

En el capítulo cuatro se especifican los diferentes contaminantes atmosféricos, teniendo énfasis en aquellos denominados como contaminantes criterio. De igual forma, se presentan los impactos relacionados a los contaminantes y su normatividad, la cual sirve para tener un control en la salud pública. Por último, se muestran las tecnologías de generación de electricidad relacionadas con los contaminantes que emiten.

CAPÍTULO 5

Metodología

Para este capítulo se muestra la metodología y el modelo matemático propuesto para el cumplimiento del objetivo de esta tesis. Se describen los pasos a seguir para la obtención del impacto en la salud a causa de la generación de energía eléctrica, así como la evaluación económica de ésta misma y la descripción de los datos que fueron usados.

CAPÍTULO 6

Análisis de resultados

Por último, en el capítulo seis se presentan los resultados obtenidos después de emplear la metodología, se exponen los objetivos planteados en un inicio y se hace un análisis de los resultados alcanzados.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

La contaminación atmosférica es un problema de salud pública, el cual surge por la emisión de contaminantes de diferentes tipos de fuentes que pueden ser de origen natural o por actividades del ser humano [1]. Una de las actividades que aporta a dicha contaminación ambiental es la generación de energía eléctrica, debido a que algunas de las tecnologías de producción de electricidad necesitan de la quema de combustible fósil.

Dado que la generación de energía eléctrica contribuye a la contaminación del aire, se han hecho diversos estudios alrededor del mundo para cuantificar el impacto que deja esta actividad, algunos de estos estudios son de gran complejidad por la cantidad de información que se necesita y las herramientas computacionales que se requieren. Unos estudios cuantifican el daño que crea la generación de energía eléctrica como externalidades, en donde se evalúan impactos en la salud, en cultivos, en materiales y en ecosistemas [2]. Sin embargo, esto dependerá de la información con la que se cuente. Otros estudios únicamente cuantifican la mortalidad que se tiene en ciertas regiones y se hace una evaluación económica del daño.

Hacer esta estimación es relevante, ya que con la ayuda de estos estudios se visibiliza la problemática que existe y dado que el ser humano cada vez requiere de más electricidad y que es creciente el número de habitantes en el mundo es necesario cuantificar el daño que ocasiona en la salud la producción de electricidad.

A continuación, se describen algunos de los estudios que se encargan de cuantificar el impacto que deja la generación de electricidad, en donde los primeros tres son de nivel internacional y, por último, se exponen algunos de los estudios que se han realizado en México.

EXTERNE

ExternE es un proyecto iniciado en 1991 por la Comisión Europea en colaboración con el Departamento de Energía de Estados Unidos. En este proyecto se aplica la metodología de vías de impacto, que sirve para calcular las externalidades de la producción de electricidad.

Las externalidades pueden definirse como el efecto positivo o negativo cuando es suministrado un bien o un servicio y que afectan o pueden afectar a un tercero. Estas externalidades suceden cuando el costo por el bien o servicio que es pagado es diferente al costo total de los daños y beneficios en términos económicos, sociales, ambientales y a la salud, que implican su producción y consumo [3].

Con ayuda de este proyecto se puede hacer una clasificación de tecnologías teniendo en cuenta el impacto que tienen en la sociedad y en el ambiente, también se puede saber cuáles son las tecnologías más perjudiciales o las más limpias y menos contaminantes [4].

Uno de los principales problemas para el cálculo de las externalidades es que no todas tienen la misma unidad, es por esto por lo que los impactos son transformados en una unidad en común (monetaria) [4].

Para el cálculo de los impactos debidos a la contaminación por producción de energía se utiliza la metodología de vías de impacto, que posee una serie de pasos los cuales se describen a continuación:

- I. Emisión: especificar cuáles son las tecnologías, los contaminantes que emite y su localización.
- II. Dispersión: calcular el aumento de las concentraciones de los contaminantes en las regiones afectadas, en este paso se utilizan modelos de dispersión.
- III. Impacto: cuantificar la dosis a partir del aumento en la concentración del contaminante, para después calcular los daños en unidades físicas de la dosis utilizando una función dosis-respuesta.
- IV. Costo: valorar económicamente los impactos.

Para lograr el cálculo del costo de los daños, en este proyecto se utiliza un paquete de software llamado EcoSense, el cual combina modelos atmosféricos, bases de datos, funciones de dosis-respuesta y valores monetarios [4]. EcoSense es uno de los programas con mayor complejidad, dado que tiene la posibilidad de cuantificar diferentes impactos como en salud, en cultivos, en materiales y en ecosistemas [2].

En 2020 se publicó un estudio realizado para los países bálticos, que abarca Lituania, Letonia y Estonia, en él se determinó el costo externo en la salud debido a la generación de energía eléctrica. Para lograr lo anterior se basaron en el modelo ExternE y como resultado se obtuvo que el costo en la salud para los países bálticos atribuibles a la generación de energía eléctrica que utiliza combustible fósil es de 1,770 millones de euros considerando el periodo de 2010 a 2018 [4].

CHINA E INDIA

En China e India se calcularon los impactos que se tienen en la salud debido a las emisiones de PM_{2.5} que genera la producción de electricidad en un estudio publicado en 2018. En ese trabajo se implementó el modelo WRF-Chem versión 3.6.1, que es una versión más compleja al Weather Research and Forecasting (WRF), el cual es un sistema de predicción meteorológica que se basa en condiciones atmosféricas reales o en condiciones idealizadas [5]. Se obtuvo la mortalidad utilizando un modelo de Respuesta Integrada a la Exposición (IER), por sus siglas en inglés, datos de la población y tablas de vida de la Organización Mundial de la Salud. Como resultado de este estudio se obtuvo que para el año 2013 China tuvo 0.5 millones de muertes debido a las emisiones por producción de electricidad e India 0.3 millones [6].

INDIA

En India, el 75% de la electricidad producida es por la generación con centrales carboeléctricas, esto es preocupante, ya que estas plantas son consideradas muy contaminantes y el uso de este tipo de tecnología se ha expandido muy rápido en el país en los últimos años y se planea que para 2030 crezca aún más [7].

En 2021, la revista científica Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) [7] publicó un estudio en el que cuantifican la mortalidad debida a las centrales eléctricas de carbón en India. Se examinan las implicaciones que se tienen en la salud por las centrales carboeléctricas existentes en 2018, así como las de la expansión de la capacidad que se tiene prevista para 2030.

En este estudio se usó el Comprehensive Air quality Model with extensions (CAMx), éste es un modelo fotoquímico de malla, que requiere diversos archivos de entrada, los cuales tienen un formato específico en donde la información debe ser preparada. El tipo de datos que se necesitan

son sobre meteorología, calidad del aire, emisiones, geografía y mediciones por satélite [7]. CAMx fue usado para modelar los efectos de las emisiones de PM_{2.5} ambientales que generan las centrales eléctricas.

Respecto al cálculo de las muertes atribuibles a las centrales carboeléctricas, primero, se calcularon las muertes totales asociadas a la contaminación por PM_{2.5} ambiental y se multiplicó por la fracción de PM_{2.5} atribuible a las centrales eléctricas para así obtener el cálculo de las muertes derivadas por la producción de electricidad. La estimación de muertes atribuibles a las plantas eléctricas de carbón existentes y previstas en este estudio fue de 112,000 muertes anuales [7].

MÉXICO

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) publicaron dos estudios en donde se calculan las externalidades que se tienen por la producción de energía en México. El primero fue publicado en 2004, en él se estimaron las externalidades en 11 zonas en las que se hallaban las 13 plantas termoeléctricas más grandes del país que usaban como combustible carbón o combustóleo. Dichas plantas generaban casi la mitad de la electricidad en México en el año 2000. Lo anterior ha cambiado significativamente dado que para el año 2016 las zonas estudiadas generaron aproximadamente el 8.3% de la generación total [8].

Para la estimación de externalidades se usó la metodología de vías de impacto empleando el modelo SIMPACTS, el cual fue creado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para países que no cuentan con suficiente información; sin embargo, la información que se requiere aún es basta, ya que se necesitan datos de entrada como: densidad regional de los receptores, ubicación, altura de chimenea, tasa de emisión, velocidad de decaimiento, velocidad media del viento, temperatura de los gases de escape, velocidad de los gases de escape, entre otros, dependiendo de qué tan exacto se quiera que sea el cálculo [9].

Como resultado de este estudio se obtuvo un costo total de externalidades de 465 millones de dólares para las 11 zonas que fueron estudiadas, este monto representó el 0.1% del producto interno bruto en México, para el año 2000 [8].

El segundo estudio fue publicado en 2007 y en él se hizo una evaluación de externalidades ambientales del sector de energía en Tula, en el estado de Hidalgo y Salamanca, en el estado de Guanajuato. Estas dos zonas fueron elegidas debido a que se consideraron como zonas críticas por el volumen de emisiones que generan y por la cercanía a centros de población. Para esta evaluación, se utilizó la metodología de vías de impacto [10].

El resultado que se generó gracias a esta investigación fue que las externalidades ambientales del sector energía para el año 2004 en las zonas estudiadas fue de 1,072 millones de dólares. Este cálculo toma en cuenta únicamente el efecto en la salud por las emisiones generadas. Es importante mencionar que, para este estudio se tomaron en cuenta no sólo centrales eléctricas sino también refinerías. En el caso de Tula, se consideraron las centrales termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y ciclo combinado Tula y la refinería Miguel Hidalgo. Para Salamanca se incluyeron la refinería Ing. Antonio M. Amor y la termoeléctrica de Salamanca [10].

Otro de los estudios que se han hecho en México para evaluar los impactos en la salud debido a la generación de energía es el publicado por el Instituto Nacional de Ecología (INE), en 2006 [11]. El cual muestra una metodología para estimar dichos daños, en donde se calcula el número de muertes con un coeficiente de concentración-respuesta, una tasa de mortalidad, la concentración del contaminante y la población afectada. El documento incluye un estudio de caso para la central termoeléctrica Adolfo López Mateos ubicada en Tuxpan, Veracruz, en el que se estimó que el impacto en la salud que genera esa central es de 30 muertes anuales, lo que representa 9 millones de dólares al año. Dicho cálculo sólo incluye a la población mayor de 30 años y los impactos se le atribuyen a la contaminación por $PM_{2.5}$ [11].

CAPÍTULO 2

ESCENARIO ACTUAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

A lo largo del tiempo la energía eléctrica se ha vuelto indispensable para el ser humano, debido a que con ella se cubren necesidades como la conservación de alimentos, iluminación, climatización de espacios, etc. La electricidad no sólo cubre necesidades en el sector residencial, sino también son indispensables para hospitales, escuelas, comercios, industrias y transporte.

2.1 SISTEMA ELÉCTRICO

La energía eléctrica es de suma importancia para la población, dado que se encuentra ligada al desarrollo porque ésta facilita la innovación, el crecimiento y la prosperidad para las economías [12]. Para que la electricidad sea consumida debe existir un sistema eléctrico de potencia, que se puede definir como un conjunto de subsistemas eléctricos que tienen como objetivo la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica [13], dichos subsistemas se describen con mayor detalle a continuación:

GENERACIÓN

La generación es el subsistema que se encarga de convertir la energía primaria en electricidad. En este proceso se utilizan dispositivos como turbinas, que son las encargadas de convertir la energía primaria a energía mecánica, y generadores eléctricos que sirven para transformar energía mecánica a energía eléctrica [14].

TRANSMISIÓN

La transmisión se encarga de transportar la energía de las centrales generadoras a centros de consumo, esta transferencia se logra con ayuda de subestaciones de transmisión o de potencia que sirven para modificar y regular niveles de tensión, también se utilizan líneas de transmisión, las cuales trabajan en alta o extra alta tensión, para mejorar la eficiencia [14], [15].

Una red de líneas de transmisión se refiere a los conductores por donde se transporta la energía eléctrica, estas líneas pueden llegar a tener distancias muy largas, ya que a veces se requiere

una conexión en zonas alejadas porque puede que los centros de consumo estén apartados de las zonas de generación. Existen tres tipos de líneas de transmisión: aérea, subterránea y submarina. En donde el uso de cada uno de estos tipos dependerá de la longitud que se quiera abarcar. Por ejemplo, las aéreas generalmente se usan cuando se quiere un transporte de energía a una distancia larga, mientras que las subterráneas y submarinas se manejan con distancias menos extensas [16].

DISTRIBUCIÓN

Este subsistema tiene como objetivo llevar electricidad a todos los usuarios finales. Para que la energía sea consumida se necesitan redes de distribución y subestaciones eléctricas reductoras, que como su nombre lo indica reducen el nivel de tensión para que la energía eléctrica pueda ser utilizada [14], [15].

2.2 SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es uno de los más grandes y complejos que existen en el mundo, debido a que ofrece su servicio a 128 millones de personas que habitan en México, alcanzando así un 98.7% de cobertura [17]. El SEN está constituido por cuatro sistemas eléctricos aislados:

- I. El Sistema Interconectado Nacional (SIN), el cual es el de mayor extensión, abarca casi toda la red eléctrica nacional, lo que lo hace un sistema más confiable porque cuando hay una zona que presenta una mayor demanda, la electricidad puede ser transmitida al momento.
- II. El Sistema Eléctrico Baja California (BC), que se encuentra conectado a la red eléctrica de Estados Unidos por medio de dos líneas de transmisión a 230 kV.
- III. El Sistema Eléctrico Baja California Sur (BCS), este sistema se encuentra eléctricamente aislado.
- IV. El Sistema Eléctrico Mulegé, al igual que el sistema de BCS se encuentra aislado del resto de los demás sistemas [18].

En la Figura 2.1 se encuentran los cuatro sistemas aislados del SEN.



Figura 2.1 Sistemas eléctricos aislados, elaboración propia con datos del CENACE 2021

Desde un enfoque operativo, el SEN se encuentra dividido por nueve Gerencias de Control Regional y el sistema aislado Mulegé, siete de estas regiones se encuentran interconectadas y conforman al SIN: Central, Oriental, Occidental, Noroeste, Norte, Noreste y Peninsular. Las operaciones de todas las regiones están a cargo de los nueve Centros de Control Regional situados en distintas ciudades alrededor del país. Además, en la Ciudad de México se localiza el Centro Nacional de Control de Energía que, en conjunto con el Centro Nacional Alternativo, ubicado en la ciudad de Puebla, son los encargados de que el SEN opere de forma segura y confiable [18]. En la Figura 2.2 se muestran las nueve Gerencias de Control.



Figura 2.2 Regiones de control del SEN, elaboración propia con datos del CENACE 2021

2.2.1 CAPACIDAD INSTALADA

La capacidad instalada de energía eléctrica se refiere a lo que puede generar una central eléctrica en condiciones ideales [19]. En 2021, la capacidad instalada del SEN fue de 83,121 MW, de los cuales el 36.47% corresponde a la capacidad de centrales eléctricas con generación de energía limpia y el 63.53% para centrales eléctricas con energía fósil.

En la Figura 2.3 se muestran las tecnologías utilizadas para generación eléctrica con el porcentaje de aportación de capacidad instalada, incluidas las unidades de prueba al 30 de abril de 2021. En ella se observa que la mayor aportación de la capacidad instalada es por ciclo combinado con un 39.18% y, en segundo lugar, se encuentra la tecnología hidroeléctrica con un 14.1%.

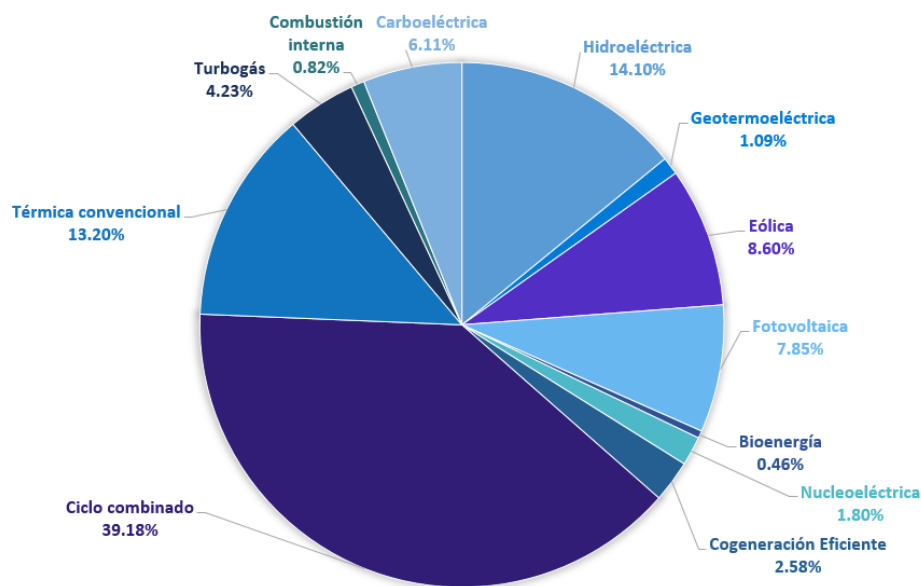


Figura 2.3 Porcentaje de capacidad instalada en el SEN por tecnología, elaboración propia con datos del CENACE 2021

2.2.2 EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA

El porcentaje de penetración de la capacidad instalada a lo largo del tiempo varía dependiendo del tipo de tecnología, a continuación, se analiza la evolución de la capacidad instalada para las tecnologías con fuentes fósiles y para las tecnologías de generación de energía limpia en un lapso de 15 años, iniciando por el año 2005 hasta el 2020.

ENERGÍA FÓSIL

En la Figura 2.4 se observan los cambios que han tenido las tecnologías con fuentes fósiles a lo largo del tiempo, en ella se ve cómo las tecnologías de combustión interna y turbogás han sido constantes en el lapso analizado, mientras que ciclo combinado tiene un crecimiento considerable cada año, que representa un incremento del 88% en los últimos 15 años. De forma contraria, la termoeléctrica convencional decrece, pero no en gran medida. Por último, la carboeléctrica se mantiene constante los primeros años, sin embargo, existe un crecimiento en 2015, pero después de ese año vuelve a no tener variación en su capacidad instalada.

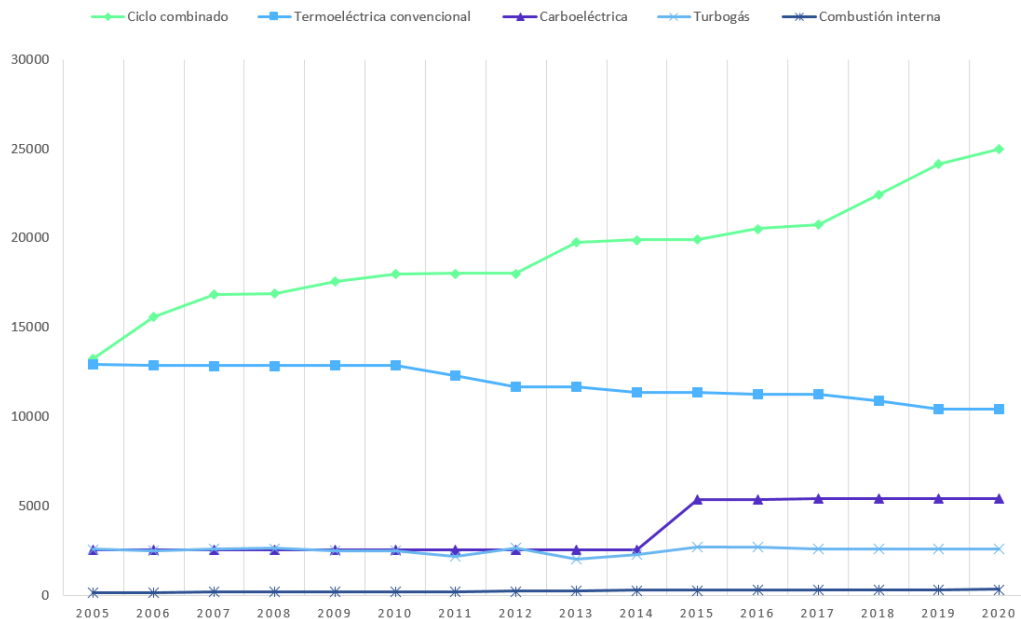


Figura 2.4 Evolución de la capacidad instalada, tecnologías con fuentes fósiles (MW), elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE)

ENERGÍA LIMPIA

La tecnología que más contribuye a la capacidad instalada atribuible a energía limpia es la hidroeléctrica, lo que representó para 2021 una capacidad de 12,614 MW, que significa el 14% del total nacional. La energía eólica y fotovoltaica tuvieron un incremento en el año 2012, sin embargo, la aportación aún sigue siendo baja. Por otra parte, se encuentra la nucleoeleétrica, la cual se ha mantenido debido a la central eléctrica Laguna Verde, que es la única planta nucleoeleétrica en México, ésta se encuentra ubicada en el estado de Veracruz y en 2021 reportó una capacidad instalada de 1,608 MW [18]. La evolución de la capacidad instalada por energía limpia se muestra en la Figura 2.5.

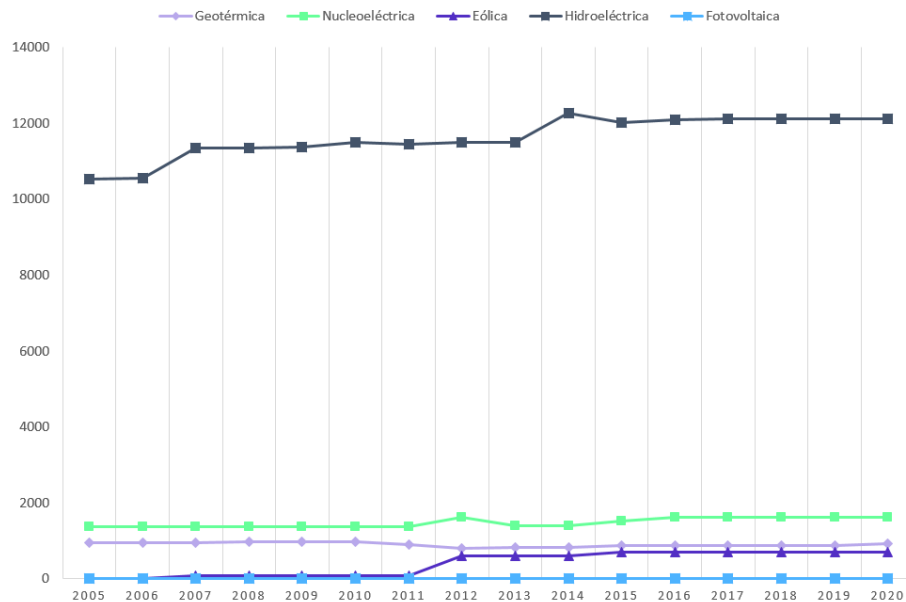


Figura 2.5 Evolución de la capacidad instalada, energía limpia (MW), elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE)

2.2.3 GENERACIÓN

En 2020, México contribuyó aproximadamente con el 1.2% de toda la generación de energía eléctrica producida en el mundo, posicionándose así, en el lugar número 15 dentro de los principales países con mayor producción de electricidad a nivel mundial [20].

En el año 2021, se tuvo una generación de energía eléctrica total de 99,097 GWh, en donde el 71.72% es generación por tecnologías que utilizan fuentes fósiles y el 28.28% proviene de energía limpia. Las tecnologías que más contribución tienen es ciclo combinado con 56.41%, hidroeléctrica (8.91%) y térmica convencional (7.67%). En la Figura 2.6 se encuentra el porcentaje de generación eléctrica por tipo de tecnología.

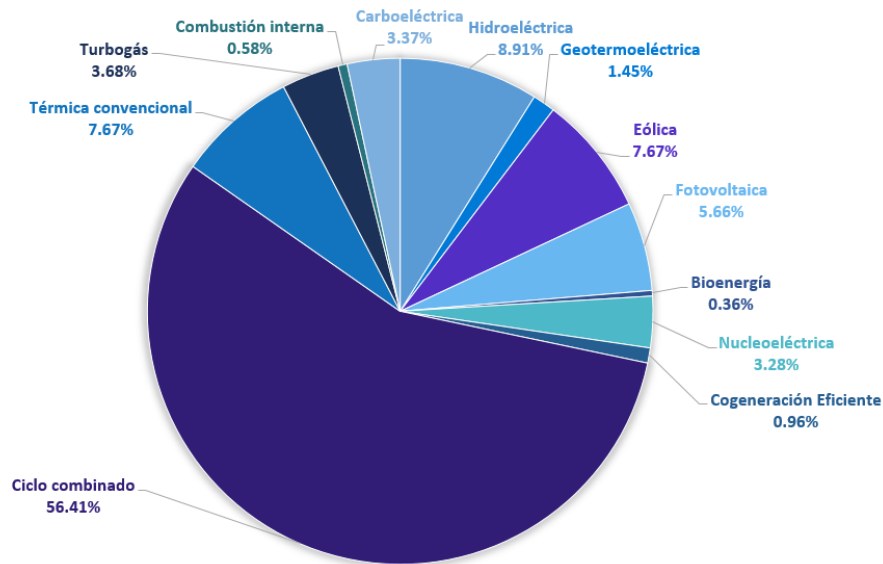


Figura 2.6 Porcentaje de generación de energía por tecnología, elaboración propia con datos del CENACE 2021

2.2.4 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN

La generación de energía se puede dividir en dos categorías: la primera, se constituye de la energía producida por tecnologías que utilizan sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso que contienen carbono y que han sufrido una transformación a través de procesos geológicos [21], y la segunda, según la Ley de la Industria Eléctrica en su artículo 3, fracc. XXII [21], son las tecnologías que generan energía limpia, lo que significa que la producción de electricidad no rebasa los umbrales establecidos de las emisiones o residuos en su proceso, entre ellas se encuentran, las centrales nucleoeléctricas, de cogeneración eficiente y aquellas que utilicen fuentes renovables. De acuerdo con la Ley de Transición Energética [3], en su artículo décimo sexto, determina que para que la Secretaría de Energía (SENER) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) establezcan que una tecnología es limpia, deben basarse en la tasa de emisión de máximo 100 kg/MWh para que dicha tecnología pueda categorizarse de baja emisión de carbono.

TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA FÓSIL

- Carboeléctrica

Las centrales carboeléctricas usan como combustible el carbón, el cual es un recurso natural de origen fósil. Este tipo de centrales tienen un funcionamiento similar al de las termoeléctricas convencionales, sin embargo, la diferencia está en el generador de vapor, debido a que el de las carboeléctricas son más complejos y de mayor tamaño. Otra de sus características es que necesitan que el combustible sea preparado antes de su empleo, ya que el carbón pasa por un pulverizador y secado [15], [22].

Las carboeléctricas tienen una mejor eficiencia respecto a las termoeléctricas convencionales, pero el uso de esta tecnología conlleva grandes cantidades de contaminantes emitidos a la atmósfera, por lo que se pueden integrar ciertos sistemas para reducir las emisiones [15], a pesar de ello, en México se ha optado por una planeación en la que no se encuentre este tipo de tecnología en su matriz energética por los daños que conlleva.

Para 2021 se reportó que en México hay tres centrales carboeléctricas, en el estado de Coahuila se encuentran dos de ellas: Carbón II y José López Portillo (Río Escondido), las cuales tienen una aportación de 1,400 MW y 1,200 MW, respectivamente. Coahuila es el principal productor de carbón en México, por lo que utilizan el carbón producido para ambas centrales. Por último, está la central presidente Plutarco Elías Calles (Petacalco) ubicada en Guerrero, que es la de mayor contribución, puesto que posee 2,778 MW de capacidad instalada, en ella se utiliza como combustible carbón importado, sin embargo, tiene la cualidad de ser una central dual, por este motivo también puede utilizar combustóleo como combustible [15], [23].

•Termoeléctrica convencional

Una central termoeléctrica convencional funciona a partir de la quema de combustible fósil, en ella se pueden utilizar diversos combustibles como: carbón, gas natural y derivados de petróleo. Su principio de funcionamiento se basa en la transformación que sufre el agua en su estado líquido a vapor, dicho vapor se expande en una turbina y cuando llega a una temperatura y presión específicas se provoca un movimiento mecánico que impulsa el generador eléctrico para así obtener electricidad. Después, un condensador utiliza el vapor que sale por la turbina para convertirlo en agua y, por último, se emplea una bomba para llevar el flujo de nuevo al generador y poder repetir el ciclo [15], [22].

Este tipo de centrales operan mediante el ciclo Rankine, que es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor [24], éste se compone de cuatro procesos:

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador

Este ciclo ideal suele ser modificado para utilizar vapor sobrecalentado y así tener una mejor eficiencia térmica [22]. A continuación, en la Figura 2.7, se presenta de manera gráfica el ciclo Rankine ideal.

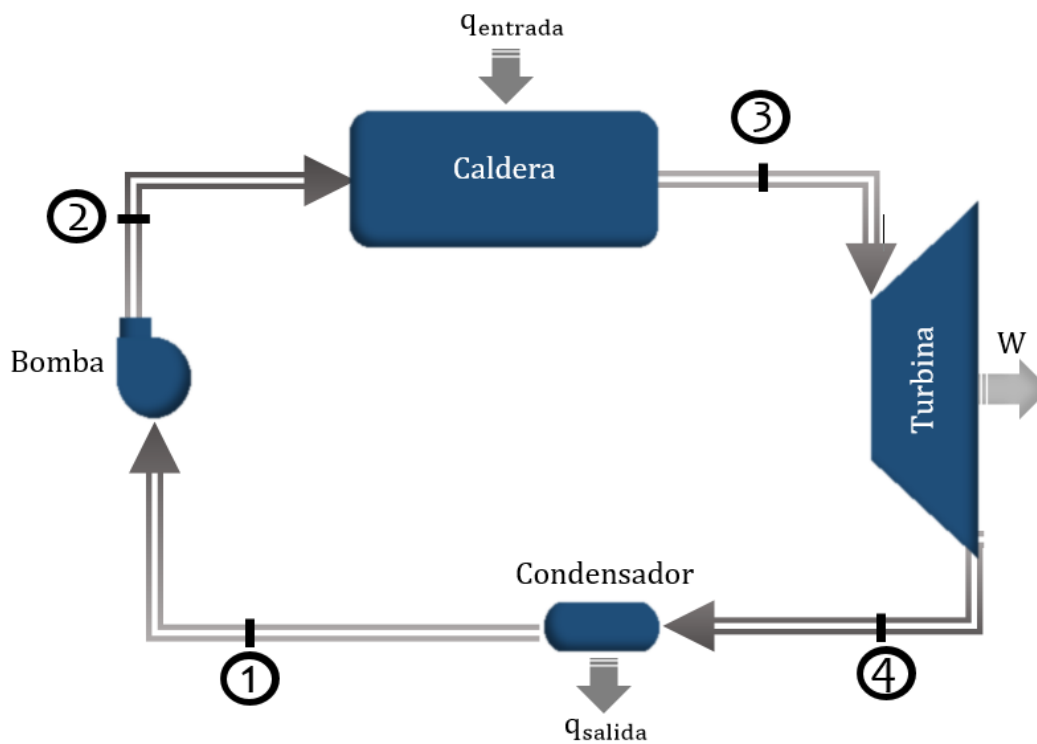


Figura 2.7 Ciclo Rankine ideal

Esta tecnología se caracteriza por su baja eficiencia y por la gran cantidad de contaminantes que arroja a la atmósfera debido a la quema de combustible fósil [15].

En 2020, la capacidad instalada de las centrales termoeléctricas convencionales se concentró principalmente en los estados de Veracruz teniendo el 16% del total de la capacidad instalada por este tipo de tecnología, Hidalgo (15%), Colima (11%), San Luis Potosí (11%) y Sinaloa (8%) [18].

• Turbogás

Las centrales turbogás pueden utilizar gas natural o diésel como combustible, estas plantas se componen principalmente de una turbina de gas, una cámara de combustión y un compresor. Las turbinas de gas trabajan comúnmente en un ciclo abierto, en donde el aire del ambiente entra al compresor para que su temperatura y presión asciendan, el gas resultante que pasa por el compresor, luego se dirige hacia la cámara de combustión, en el que el combustible es quemado. El producto del paso por la cámara, son gases a alta temperatura, los cuales entran a la turbina y se expanden para convertirse en potencia mecánica para luego ser transformada en electricidad mediante un generador eléctrico, por último, los gases que salen de la turbina son arrojados hacia el exterior [15], [23].

El proceso anteriormente descrito se basa en el ciclo Brayton, véase Figura 2.7, el cual fue propuesto por George Brayton, que está constituido por cuatro procesos:

- 1-2 Compresión isentrópica (en un compresor)
- 2-3 Adición de calor a presión constante
- 3-4 Expansión isentrópica (en una turbina)
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante

Las turbinas de gas se pueden clasificar como:

- I. Aeroderivadas: Sirven para la producción de electricidad en plantas industriales, este tipo de turbinas alcanzan hasta 50 MW y poseen un diseño compacto.
- II. Industriales: Son creadas para la generación de energía eléctrica, pero a potencias mayores, ya que pueden alcanzar hasta los 500 MW, tienen una mejor eficiencia y operan por lapsos más extensos [25].

Aunado a lo anterior, en 2018 se reportó que en México había un total de 131 plantas de turbogás, colocándose, así como la segunda tecnología con mayor número de centrales [26], sin embargo, de la capacidad instalada total para 2021 sólo representó el 4.2%, siendo el estado de

Nuevo León el de mayor participación con un total de 860 MW, los estados que le siguen son: Baja California, México, Guanajuato y Baja California Sur [18].

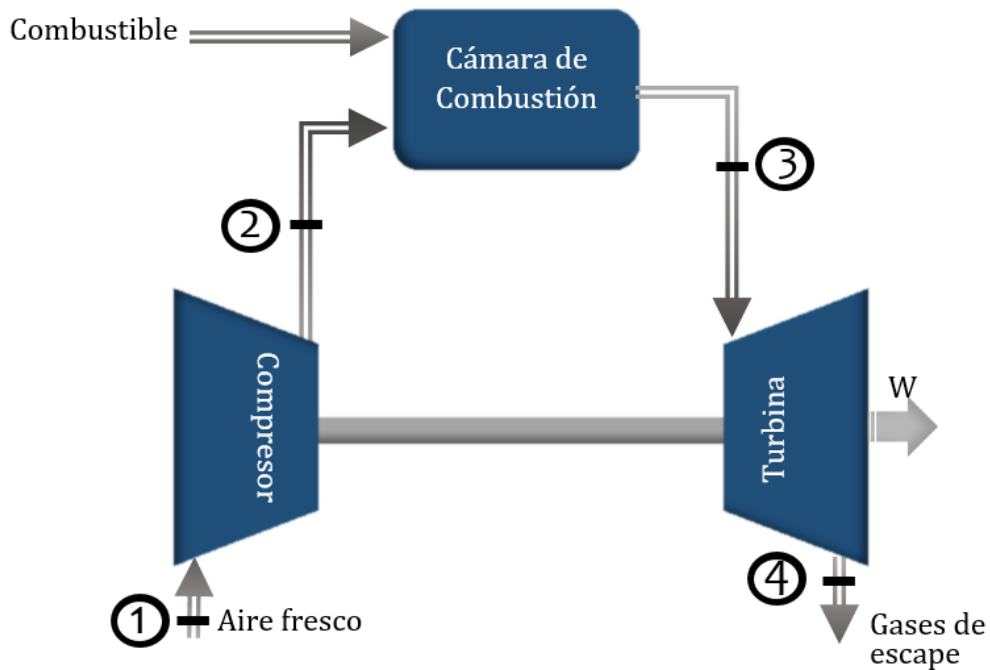


Figura 2.8 Ciclo Brayton

- Ciclo combinado

Las centrales de ciclo combinado se componen de dos unidades de generación; una gasoeléctrica y una termoeléctrica. El proceso de este tipo de planta se puede entender como la combinación del ciclo Brayton con el ciclo Rankine (véase Figura 2.9), en donde inicia tomando aire del medio ambiente para que atraviese por un filtro y sea comprimido al pasar por el compresor, luego, es mezclado con gas natural en la cámara de combustión y después de eso se obtiene un flujo de gas con una temperatura y presión elevada, posteriormente es transmitido a la turbina en donde se produce un movimiento mecánico, que después se convertirá en electricidad, sin embargo, ahora los gases de escape que expulsa la turbina son utilizados como fuente de calor con el fin de calentar el vapor que necesita la turbina de vapor para producir energía eléctrica [25].

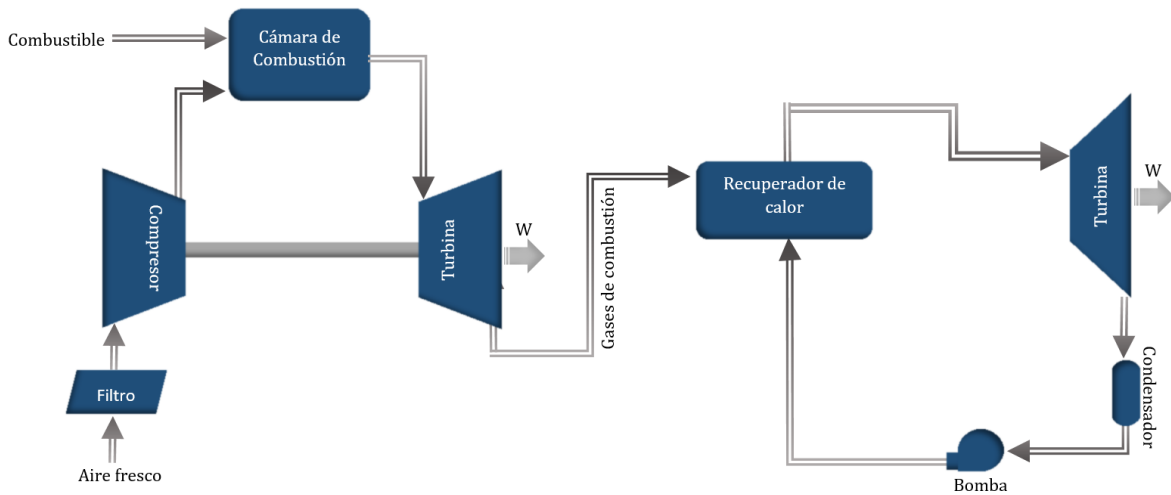


Figura 2.9 Brayton - Rankine

Esta tecnología posee diversas ventajas, algunas de ellas es que tiene mejor eficiencia respecto a las otras tecnologías, su costo de inversión es menor, puede construirse en dos etapas (es modular), cuentan con un diseño compacto, dado que ocupa menos espacio que una térmica convencional de la misma capacidad, se distingue por tener una operación continua y una tasa de emisión baja, ya que emite en promedio 346 kg de CO₂ por cada MWh generado, lo que la pone por debajo de la media [15].

El ciclo combinado es la tecnología predominante para la generación de electricidad en México, para 2021 se tuvo que el 56.4% de la energía eléctrica producida fue a partir de las centrales de ciclo combinado. Para la capacidad instalada representó el 39.18% a nivel nacional y más del 50% de la capacidad instalada de ciclo combinado se concentró en Nuevo León, Tamaulipas, Sonora y Veracruz [18].

• Combustión interna

Las centrales de combustión interna se basan en el funcionamiento del ciclo Diésel, en el que se utiliza la expansión de los gases de combustión para conseguir energía mecánica y luego ser transformada en electricidad a través del generador. En el proceso, se hace uso del aire exterior que es comprimido para alcanzar una temperatura elevada y después utilizar un inyector de combustible logrando así la combustión y con ello un movimiento mecánico [22].

El ciclo Diésel ideal para motores está constituido por cuatro procesos:

- 1-2 Compresión adiabática
- 2-3 Suministro de calor a presión constante
- 3-4 Expansión adiabática
- 4-1 Rechazo de calor a volumen constante

Los motores pueden ser de dos o cuatro movimientos del pistón. El de dos movimientos necesita de sólo una vuelta del cigüeñal para completar el ciclo, mientras que el de cuatro movimientos necesita dos vueltas. En seguida, se describe el funcionamiento de los dos tipos de motores:

I. Dos movimientos

- Escape y admisión: Primero, la válvula de escape se encuentra abierta y mientras que el pistón baja, el aire del exterior entra mediante un turbocargador por medio de unas lumbreras de admisión.
- Compresión: El pistón sube y las lumbreras se cierran junto con la válvula de escape para que pueda iniciar la compresión del aire, cuando el aire es comprimido, éste se encontrará a una presión y temperatura elevada.
- Carrera de potencia: El combustible se introduce con un inyector y la combustión surge debido a la alta temperatura del aire comprimido y esto hace que el pistón sea desplazado.

II. Cuatro movimientos

- Admisión: Es el momento en el que el pistón baja, la válvula de admisión está abierta y hay una entrada de aire en el cilindro.
- Compresión: Las válvulas permanecen cerradas, el pistón sube y comprime el aire, lo que ocasiona un aumento en la presión y temperatura.
- Carrera de potencia: El combustible es introducido con ayuda del inyector. Al haber una temperatura alta, el combustible se incendia y hace que el pistón se desplace.
- Escape: La válvula de escape está abierta y los gases resultantes de la combustión salen cuando el pistón se eleva (ver Figura 2.10).

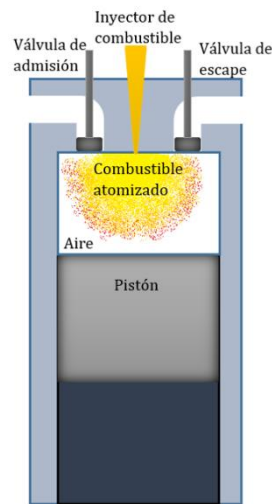


Figura 2.10 Carrera de potencia en un motor diésel de cuatro movimientos

La tecnología de combustión interna es la que cuenta con el mayor número de centrales en México, teniendo un total de 248 centrales reportadas en 2018, a pesar de ello no alcanza el 1% en la capacidad instalada ni en la generación de electricidad nacional. El estado en donde se concentró el 40% de la capacidad instalada con esta tecnología fue Baja California Sur [18].

En definitiva, la producción de energía eléctrica mediante combustión interna es costosa comparada al resto de las tecnologías, otra particularidad es que las centrales pueden estar en marcha en un corto tiempo, por lo que su uso se da en la demanda punta o en zonas en las que no hay acceso a electricidad como es el caso de BCS [15].

TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA LIMPIA

Como se dijo anteriormente, la energía limpia se define como las fuentes de energía o procesos de generación de electricidad que no rebasan los estándares de emisiones establecidos [3]. Las energías limpias se pueden dividir en renovables y no renovables, según su fuente.

•Renovables

Hidroeléctrica: Es aquella que aprovecha un volumen de agua a partir de su energía cinética o potencial [27]. Para la generación de electricidad se utilizan turbinas por las que pasa agua en su interior para producir un movimiento mecánico y después transformarlo en energía eléctrica mediante un generador.

Las centrales hidroeléctricas se dividen principalmente en dos tipos; grandes centrales hidroeléctricas y centrales hidroeléctricas menores. La instalación de cada una de ellas dependerá de las condiciones geológicas de la zona en la que se quiera captar el recurso [15].

Eólica: Ésta explota la energía cinética del aire en movimiento a partir de grandes turbinas (aerogenerador) ubicadas en tierra o en mar [28]. En esta tecnología el rotor es el encargado de convertir la energía cinética a energía mecánica, mientras que el generador convierte la energía mecánica en eléctrica.

Solar: La energía solar es obtenida directamente del Sol en forma de radiación, se puede producir electricidad mediante procesos fotovoltaicos o por concentración solar [28]. A pesar de tener un recurso variable es posible predecir su disponibilidad con ayuda de herramientas [15].

Bioenergía: En ella se utilizan residuos animales o vegetales, que al pasar por varios procesos ésta puede ser utilizada para generar electricidad. La producción de la bioenergía depende de la disponibilidad en cada zona [28].

Geotérmica: La energía geotérmica es el calor generado al interior de la tierra, las centrales geotérmicas operan igual que las termoeléctricas convencionales, sin embargo, el vapor que se usa se obtiene del subsuelo [15]. Cuando se utiliza la energía geotérmica en las centrales eléctricas éstas pueden generar de forma constante.

Oceánica: Ésta se produce debido al movimiento generado por las mareas, la cual es aprovechada mediante turbinas para crear electricidad, también se puede hacer uso de la diferencia de temperatura que existe en el océano para generar energía eléctrica.

• No Renovables

Nucleoeléctrica: Las centrales nucleares trabajan similar a una termoeléctrica convencional, con la diferencia de que en la nuclear no existe un proceso de combustión, sino que el vapor se obtiene mediante la fisión del uranio [15].

Cogeneración eficiente: La producción de electricidad por cogeneración eficiente se refiere a la energía eléctrica que se puede aprovechar de los procesos comerciales e industriales a partir del mismo combustible [15].

CAPÍTULO 3

HISTORIA Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Es importante saber la historia de la energía eléctrica en México para poder entender los cambios por los que ha pasado y lograr planear de una forma en la que sea benéfica para todos, en donde las personas tengan electricidad y puedan cubrir necesidades sin dejar a un lado la importancia de utilizar tecnologías que no sean tan agresivas con el medio ambiente y con los seres vivos.

3.1 HISTORIA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO

La instalación de la primera central eléctrica en México fue en el año 1879 en el estado de Guanajuato, ésta fue una central termoeléctrica de 1.8 kW que fue utilizada para una fábrica textil. Diez años después, se construyó la primera central hidroeléctrica del país, teniendo una capacidad de 22 kW, en Chihuahua, dicha central abastecía a la producción minera. Las siguientes instalaciones de centrales para la generación de energía eléctrica fueron destinadas principalmente a actividades industriales y mineras [29], [30]. Posteriormente, el número de centrales creció, debido a la innovación y al aumento de necesidades.

Dado que México cuenta con un gran potencial hídrico para la generación de energía eléctrica, la construcción de centrales hidroeléctricas incrementó en los años siguientes, tanto que para el año 1900 se estima que ya había 15 instalaciones con este tipo de tecnología. La central Necaxa, ubicada en Puebla, se consideró una de las más destacadas a mediados del siglo XX, esta planta suministraba poco más del 50% de la generación de energía eléctrica total del país y también poseía una gran distancia de transmisión, ya que iba de Puebla hasta la Ciudad de México [31], [32].

Al principio, la generación de energía se daba gracias a las empresas privadas, algunas de ellas de origen extranjero. Una de las más relevantes fue The Mexican Light and Power Company Limited, que fue la empresa de origen canadiense que obtuvo el contrato para la construcción de la central Necaxa en 1903 y sólo pasaron dos años para que la central entrara en operación. En 1910 ésta era la compañía más importante para el país, ya que contaba con aproximadamente el 80% de la capacidad instalada total, casi todas las centrales que poseían trabajaban a la frecuencia de 50 Hz [31].

Otras empresas importantes fueron la llamada American and Foreign Power Company, la cual era una compañía estadounidense que contaba con tres sistemas interconectados en el norte de México, y la Compañía Eléctrica de Chapala, que al igual que las otras dos se conformó por empresarios extranjeros, en este caso, de origen canadiense y francés, la sede de dicha compañía se ubicaba en la ciudad de Guadalajara [33]. Al inicio, estas empresas transmitían y distribuían la energía de forma local, tiempo después, las empresas privadas y extranjeras tenían el dominio de una gran parte del territorio [34].

Aunado a lo anterior, era evidente que existía un problema, ya que las empresas no operaban bajo normas específicas que beneficiaran al consumidor, por lo que se optó por la idea de crear una comisión que ayudará a resolver los problemas que se tenían. Fue hasta el año 1937 en el que se publicó la Ley que crea la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en la que se describen las facultades que debía tener esta comisión tras su creación y el patrimonio que la conformaría [35].

En 1937 sólo el 38.2% de la población mexicana disponía de electricidad, el servicio era proporcionado por las anteriores tres compañías descritas: The Mexican Light and Power Company, The American Foreign Power Company y la Compañía Eléctrica de Chapala, las cuales contaban con grandes deficiencias, ya que no existía un suministro continuo y tenían tarifas altas. En ese mismo año, el gobierno mexicano creó la CFE con el objetivo de tener un sistema eléctrico confiable, mejorando la generación, transmisión y distribución de energía para obtener un buen servicio a un bajo costo, sin propósitos de lucro [29].

Una de las obras más importantes en los inicios de la CFE fue la central hidroeléctrica de Ixtapantongo, ubicada en el estado de México. La construcción de esta central empezó en el año de 1938 y tiempo después formó parte del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, un proyecto constituido por seis plantas dedicadas principalmente a abastecer de energía eléctrica a la Ciudad de México, debido a las necesidades crecientes por la urbanización que existía en la ciudad [36], [37].

Desde los años 80's algunas de las presas del Sistema Miguel Alemán pasaron a formar parte del Sistema Hidráulico Cutzamala y hasta la actualidad siguen empleándose para suministrar de agua potable a la zona metropolitana de la Ciudad de México [38].

Como se vio anteriormente, las centrales hidroeléctricas han sido esenciales para proveer de electricidad al país desde la construcción de la primera central; sin embargo, la importancia se dio principalmente entre los años 1900 y finales de los 70's, ya que la energía que se producía mediante las plantas hidráulicas aportaba aproximadamente la misma cantidad de energía que las centrales termoeléctricas. En la Figura 3.1 se puede observar cómo después de los últimos años de los 70's la generación hidroeléctrica no tiene un crecimiento notorio, mientras que la térmica aumenta de forma significativa.

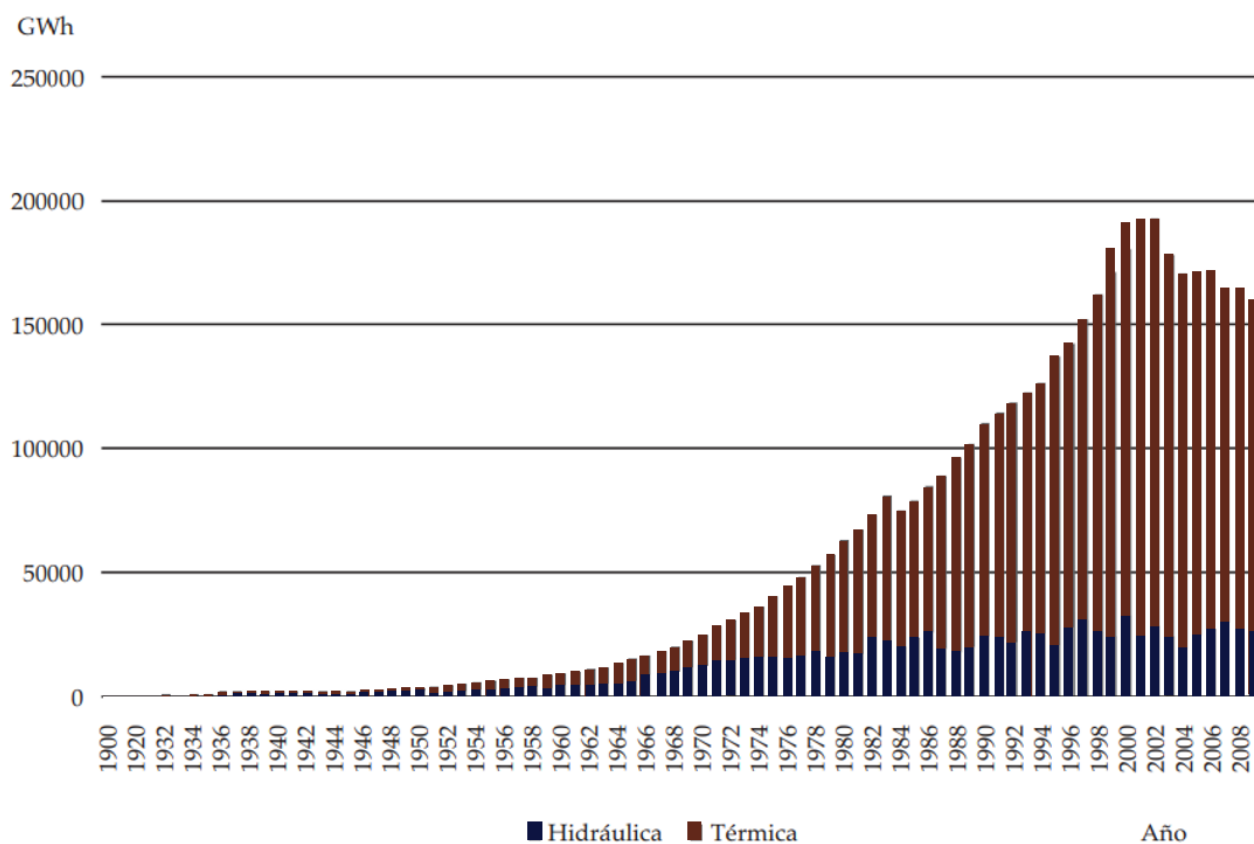


Figura 3.1 Registro histórico de la generación de energía eléctrica en México, Ramos y Montenegro 2012

Uno de los hechos que se le puede atribuir a este comportamiento es el hallazgo del campo petrolero Cantarell ocurrido en 1973, el cual se estima que produjo alrededor de 17 a 20 mil millones de barriles. Este yacimiento, ubicado frente a las costas de Campeche, fue uno de los más importantes en el mundo debido a que llegó a aportar el 45% de la producción mundial. En el año

2004 inició el descenso de la producción, ya que a mitad de ese mismo año tan sólo se tuvo una producción del 15.4% respecto al total máximo que llegó a producir dicho campo [39], [40].

Cantarell poseía grandes reservas de petróleo y gas natural, por lo que este recurso fue ideal para utilizarse como combustible en las plantas de generación de energía eléctrica, ya que al encontrarse en cantidades voluminosas se hizo rentable la construcción de centrales que emplean combustible fósil para su operación, como se vio en el capítulo 2 las principales tecnologías que utilizan petróleo, derivados o gas natural son: termoeléctrica convencional, turbogás, ciclo combinado y combustión interna.

En la Figura 3.2 se observa la generación de energía por tipo de tecnología que se produjo durante 1970 hasta 2013, en donde se muestra el notable crecimiento de la generación por termoeléctricas que se tuvo desde los 70's. Durante 30 años se priorizó la construcción de centrales termoeléctricas debido a su rentabilidad mientras que el interés por construir centrales que aprovechan recursos renovables, como las hidroeléctricas, bajó. El año con mayor generación de electricidad mediante termoeléctricas fue en 2001, justo tres años antes del inicio del agotamiento de Cantarell. Posterior a este año, se tuvo una disminución relevante por esta tecnología durante cada año siguiente y ha seguido esa tendencia hasta la actualidad.

Por otro lado, en la Figura 3.2 se muestra que la generación por ciclo combinado ha tenido un aumento visible, su crecimiento ha ayudado a cubrir la demanda que satisfacían las centrales termoeléctricas. Esta tecnología ha sido empleada debido a que las centrales de ciclo combinado se consideran menos contaminantes.

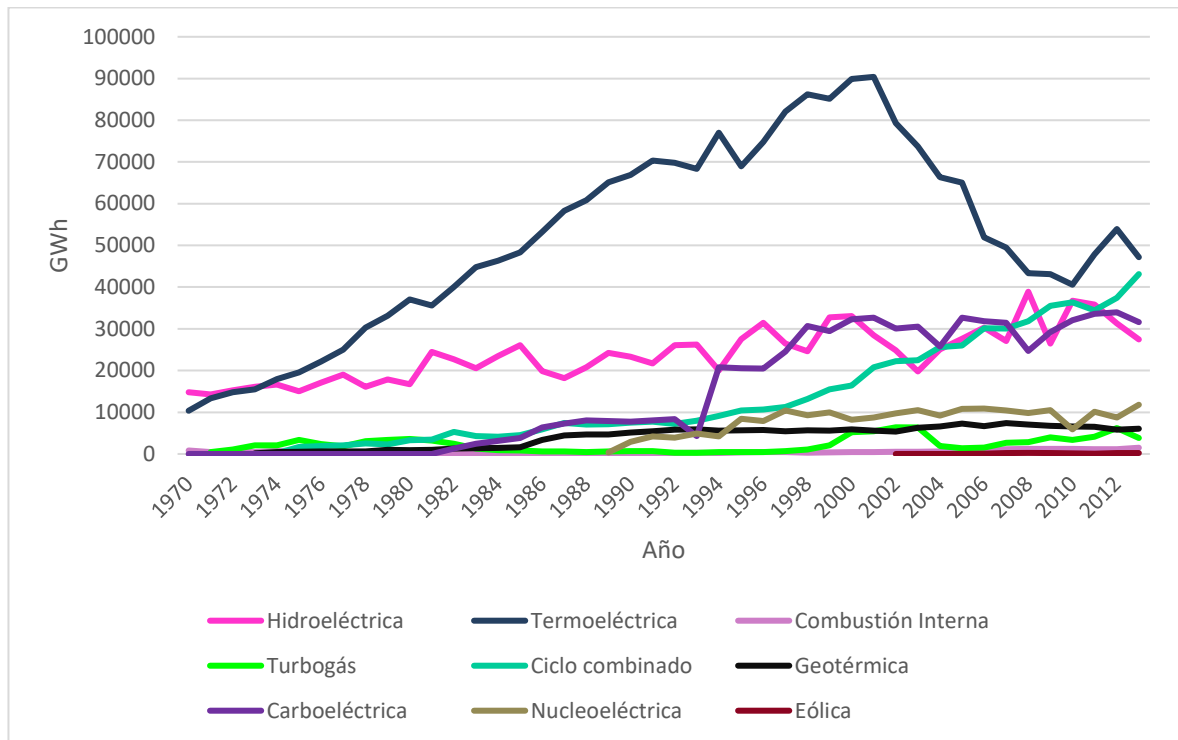


Figura 3.2 Generación de energía por tipo de tecnología 1970 – 2013, elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

3.2 TRANSICIÓN ENERGÉTICA

El inicio de la disminución de generación por termoeléctricas no sólo coincide con el decaimiento de Cantarell sino con el comienzo de la transición energética en México, este tipo de transición se puede definir como:

El cambio significativo en el sistema energético de un país, de una región, o incluso, a nivel global. A su vez, este cambio puede estar asociado a la estructura del sistema (por ejemplo, suministro centralizado vs descentralizado), a las fuentes de energía que lo alimentan, a sus costes, tanto económicos como de otro tipo, o incluso al régimen político-económico en el que tiene lugar el suministro y consumo de energía [41].

Uno de los cambios importantes para el proceso de la transición energética es la reducción de la dependencia a los combustibles fósiles, esto debido a la composición química que presentan y al proceso de combustión por el que pasan. Los combustibles fósiles son hidrocarburos, lo que

significa que su estructura química se compone de hidrógeno y carbono, y estos al estar en presencia de oxígeno y una energía de activación, ya sea una llama o chispa, producen el fenómeno de combustión. Lo que resulta principalmente de la combustión es dióxido de carbono gaseoso (CO_2) y vapor de agua (H_2O) [42], pero también se emiten otros contaminantes según el combustible que se queme.

Al saber cuáles son las fuentes responsables de las emisiones contaminantes algunos países alrededor del mundo, entre ellos México, han optado por tener una transición energética para así generar menos contaminantes a la atmósfera debido al daño que causan al planeta, como el cambio climático, y a los seres que habitan en él.

Si bien, algunos afirman que el cambio climático sólo es parte de un proceso natural de la Tierra, también existen investigaciones en donde se demuestra que las actividades humanas han tenido una aportación crucial, por ejemplo, se ha observado que desde los últimos años del siglo XIX la temperatura mundial ha aumentado de manera inhabitual, tomando en cuenta los últimos cinco siglos. Es importante recalcar que la variación del clima en el planeta sí es un fenómeno natural que se da por distintos factores: actividad volcánica, actividad solar y concentración de gases de invernadero, sin embargo, la concentración de gases de invernadero se ha convertido en el factor más importante durante el siglo XX [43].

En la Figura 3.3 se observan las anomalías de temperatura que se han tenido en la superficie terrestre durante el siglo pasado. En este sentido, el término anomalía de temperatura se entiende como:

La desviación del clima desde el punto de vista estadístico, es decir, la diferencia entre el valor del elemento climático en un periodo de tiempo determinado, por ejemplo un mes, con respecto al valor medio histórico o norma de la variable climática correspondiente, durante el mismo lapso, en un lugar dado [44].

Estas anomalías son importantes, ya que el calentamiento climático antropogénico se puede notar mediante la temperatura de la superficie, de la atmósfera y de los océanos. En la Figura 3.3 se muestran con líneas grises los fenómenos volcánicos más relevantes, con una línea negra la

temperatura media mundial, según las observaciones que se han tenido, y la línea roja es el resultado de la media que se obtuvo de diversos modelos, ambas se basan en simulaciones con forzamientos antropogénicos y naturales [45].

Es muy poco probable que el fenómeno del incremento de las anomalías de temperatura positivas (ver Figura 3.3) presentes durante los últimos 50 años se dé únicamente por forzamientos o factores naturales como lo son la actividad volcánica y la solar, por lo que la respuesta al incremento que se ha tenido en la temperatura terrestre seguramente sea debido al aumento de los gases de efecto invernadero causados por las actividades humanas [45].

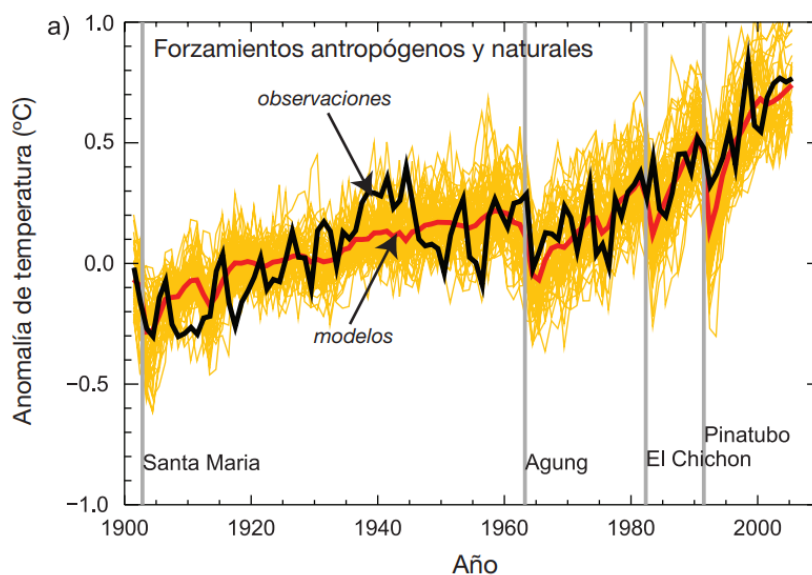


Figura 3.3 Anomalías de temperatura superficial media mundial, Resumen técnico del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Aunado a lo anterior, las emisiones a nivel mundial de gases de efecto invernadero provienen principalmente del sector energía y dentro de este sector el mayor responsable es la generación de electricidad y calor [46], esto debido a que aún se queman grandes cantidades de combustible fósil para la producción de energía eléctrica y calor.

La preocupación por transitar en un sistema energético se da principalmente para mitigar el cambio climático y mejorar la salud de las personas. Hablando en específico del sector eléctrico, lo que se busca es cubrir la demanda que se tiene agregando tecnologías renovables y de igual forma sustituir aquellas que emiten grandes cantidades de contaminantes como las tecnologías que

emplean combustibles fósiles para la producción de electricidad por unas que sean menos perjudiciales.

De igual manera, el inicio de la transición energética es el inicio de la solución a diversos problemas actuales y también la prevención de futuros daños como las muertes y enfermedades debidas al calentamiento global que causa fenómenos meteorológicos extremos, tales como tormentas, inundaciones, olas de calor y demás sucesos que son considerados como eventos perniciosos para los seres vivos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) [47] prevé que “Entre 2030 y 2050, el cambio climático causará unas 250,000 muertes adicionales cada año debido a la malnutrición, el paludismo, la diarrea y el estrés calórico”.

Definitivamente, las vidas humanas no son las únicas afectadas por el cambio climático sino también las demás especies animales y vegetales, ya que éstas pueden sufrir alteraciones en su ciclo de vida, cambios fisiológicos e inclinación por el desplazamiento hacia lugares más fríos, lo que puede generar un aumento en el riesgo de extinción [43].

Además, otro impacto que se debe disminuir es la mortalidad y morbilidad que causan los contaminantes arrojados a la atmósfera cuando existe la combustión de hidrocarburos para la obtención de calor o producción de energía mecánica, puesto que estos al ser inhalados por la población causan problemas respiratorios.

3.3 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En septiembre de 2015 la Organización de las Naciones Unidas proclamó la “Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”, la cual incluye 17 objetivos y 169 metas. En la Figura 3.4 se muestran los objetivos dichos anteriormente.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



Figura 3.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible, Naciones Unidas

El fin de esta agenda es tener una sostenibilidad económica, social y ambiental en un lapso de quince años. El término de desarrollo sostenible se entiende como:

El desarrollo que permite satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro de satisfacer sus propias necesidades, y busca atender tanto las demandas por una agenda de protección del medio ambiente como las de asegurar el desarrollo de los países con menor nivel de desarrollo [48].

La transición energética se encuentra vinculada en gran medida con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), ya que el objetivo número siete habla sobre garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible, no contaminante y moderna. Este objetivo se basa en distintas problemáticas, por ejemplo, la de los millones de personas que no tienen acceso a electricidad y a las fuentes de energía que aún se encuentran en operación y son consideradas fuertemente contaminantes [49].

Para cumplir con el objetivo siete se necesita la colaboración de todos, se requiere que los países inicien o aceleren la transición a un sistema energético menos contaminante y sostenible con

ayuda de la implementación de tecnologías renovables, también es importante darle prioridad al uso eficiente de la energía, en donde se utiliza menor cantidad de energía para satisfacer necesidades.

De esta manera, el objetivo siete de los ODS en el sector eléctrico se puede cumplir empleando tecnologías de generación de electricidad con un ciclo de vida menos contaminante como: las renovables, nuclear o aquellas más avanzadas que sí utilizan combustible fósil pero que poseen una baja emisión de contaminantes, ya sea por su eficiencia o por sus sistemas de mitigación de emisiones, por ejemplo, las centrales de ciclo combinado con gasificación integrada, las de lecho fluidizado o las carboeléctricas con captura y almacenamiento de CO₂. De manera adicional, la tasa de electrificación tiene que aumentar debido a que la electricidad no sólo debe ser menos contaminante, sino que debe llegar a todas las personas para que puedan cumplir con sus necesidades.

Otro Objetivo de Desarrollo Sostenible importante referente a los temas antes expuestos es el número tres, el cual tiene como finalidad garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a cualquier edad. Para este objetivo se tomará en específico la meta 3.9, la cual enuncia que “De aquí a 2030, se debe reducir considerablemente el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la polución y contaminación del aire, el agua y el suelo” [50]. El sector eléctrico puede aportar a esta meta, desde el cambio de tecnologías de generación de electricidad que usan combustible fósil por tecnologías renovables o menos contaminantes para que exista una disminución en el número de muertes atribuibles a la contaminación del aire.

Dicho lo anterior, la transición energética tiene la posibilidad de aportar al cumplimiento de estas metas; sin embargo, también existen retos, uno de ellos es el tiempo, dado que se habla de una transición, lo que significa que se pasa de un estado a otro y eso se da en un cierto periodo. Por lo que, se deben tener metas claras y una buena planeación para poder cumplirlas. Hablando únicamente de la generación de energía eléctrica, muchos de los retos son técnicos, dado que algunas tecnologías renovables son variables y no pueden entregar energía de forma continua, por lo que se debe buscar soluciones como el desarrollo tecnológico de los inversores y el almacenamiento de energía, ya que estas pueden servir como herramienta para contrarrestar la variabilidad de las renovables.

En algunos países la transición en el sector eléctrico se da con la ayuda de energéticos de transición, como el gas natural, el cual, aunque es un combustible fósil éste se caracteriza por tener menores emisiones contaminantes durante su combustión. Para algunos países es muy importante el uso de energéticos de transición, ya que el agregar tecnologías de generación renovable es complejo, dado que también se tienen retos geográficos. Las instalaciones de plantas con tecnología renovable deben colocarse específicamente en ciertas zonas puesto que, existen sitios ideales para la captación del recurso que se piensa usar; radiación solar, aire en movimiento, agua o calor de la tierra. Y a pesar de que el sitio sea ideal para la captación del recurso, también se debe evaluar el potencial que tiene y si la energía que entregará el recurso renovable será suficiente para cubrir la demanda.

La Generación Distribuida también sirve como instrumento para cumplir con las metas de los ODS, dado que lleva consigo grandes beneficios tanto para el usuario como para el suministrador. La Generación Distribuida se puede entender como pequeñas centrales no mayores a 0.5 MW, en donde no se requiere de un permiso para su generación y además pueden vender la electricidad que generan. Según la Ley de la Industria Eléctrica [21] la Generación Distribuida debe cumplir con dos características:

- a) Se realiza por un Generador Exento en los términos de esta Ley, y
- b) Se realiza en una Central Eléctrica que se encuentra interconectada a un circuito de distribución que contenga una alta concentración de Centros de Carga, en los términos de las Reglas del Mercado.

Las ventajas que tiene la aplicación de la Generación Distribuida son diversas. Para el usuario algunas de ellas son el uso de energía renovable, ya que esto ayuda a la disminución de contaminantes atmosféricos que se encuentran relacionados a la salud de los humanos y al cambio climático, con su uso también se incrementa la confiabilidad y la calidad de la energía, que se entiende como un suministro de energía sin interrupciones y con los parámetros dentro de los rangos establecidos: voltaje, frecuencia, corriente, etc. Del lado del suministrador, los beneficios se encuentran en la disminución de la inversión, la reducción de pérdidas en la transmisión y distribución de la energía, abasto en zonas remotas, entre otras [51].

Otro de los aspectos que se puede considerar, es la modernización de las redes eléctricas, puesto que esto ayuda a tener una mejor eficiencia y confiabilidad. La modernización es importante, dado que con ella se podrá afrontar de una mejor forma el crecimiento de la demanda y también se logrará una mejor integración de energías renovables variables [52].

En resumen, el aumento de generación de energía con recursos renovables a gran escala, la aplicación de Generación Distribuida y la modernización en las redes eléctricas son herramientas que se pueden utilizar en la transición energética y a su vez aportar al cumplimiento de los ODS.

3.4 TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO

3.4.1 ANTECEDENTES

Como se dijo anteriormente, la transición energética en México se presentó a inicios del siglo XXI. En el año 2002 se publicó por primera vez en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el Programa Sectorial de Energía pertinente al lapso 2001-2006 [53], en el cual, no se habla como tal de una transición energética, pero sí tiene entre sus estrategias motivar el uso de tecnologías eficientes y limpias. En 2008 se vuelve a publicar este programa, en el que se destaca el objetivo III.2, que habla sobre “Fomentar el aprovechamiento de fuentes renovables de energía y biocombustibles técnica, económica, ambiental y socialmente viables.” [54].

Los siguientes dos Programas Sectoriales de Energía correspondiente a los años 2013 y 2020 ya se refieren a una transición energética. En el programa de 2013 se tienen dos líneas de acción dedicadas a “Promover el fortalecimiento de capacidades en transición y eficiencia energéticas para los sectores público, social y privado.” Y “Desarrollar y establecer programas, proyectos y actividades de transición y eficiencia energética, para ahorrar energía y reducir emisiones.” [55]. Mientras que el programa de 2020 se encuentra más vinculado con la transición energética, dado que entre sus objetivos prioritarios está la organización de las capacidades científicas, tecnológicas e industriales que sean necesarias para la transición energética de México a lo largo del siglo XXI y de nuevo se promueve “[...] el aprovechamiento óptimo de los recursos renovables disponibles según las características de cada región del país, asegurando así que se cumplan los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del sistema eléctrico y mejoramiento del balance de la matriz energética.” [56].

Otros de antecedentes importantes, es la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) y la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (LASE), en la Tabla 3.1 se muestran algunos de sus aspectos relevantes:

| | |
|---|---|
| <p>Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) 2008</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Tiene por objeto regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética. • Se crea el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía. • Se tiene como meta una participación máxima de 65 por ciento de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica para el año 2024, del 60 por ciento en el 2035 y del 50 por ciento en el 2050. • Se tiene la meta de una participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica del 25 por ciento para el año 2018, del 30 por ciento para 2021 y del 35 por ciento para 2024. |
| <p>Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (LASE) 2008</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Tiene como objeto propiciar un aprovechamiento sustentable de la energía mediante el uso óptimo de la misma en todos sus procesos y actividades, desde su explotación hasta su consumo. |

Tabla 3.1 LAERFTE y LASE

En 2015 fue expedida la Ley de Transición Energética (LTE), la cual abrogó a las dos leyes antes mencionadas, esta nueva ley “[...] tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de

la energía, así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos”

[3]. Algunos de los objetivos importantes que enuncia esta ley son:

- I. Prever el incremento gradual de la participación de las Energías Limpias en la Industria Eléctrica con el objetivo de cumplir las metas establecidas en materia de generación de energías limpias y de reducción de emisiones;
- II. Facilitar el cumplimiento de las metas de Energías Limpias y Eficiencia Energética establecidos en esta Ley de una manera económicamente viable;
- III. Incorporar las externalidades en la evaluación de los costos asociados a la operación y expansión de la Industria Eléctrica, incluidos aquellos sobre la salud y el medio ambiente;
- IV. Determinar las obligaciones en materia de aprovechamiento sustentable de la energía y Eficiencia Energética;
- V. Establecer mecanismos de promoción de energías limpias y reducción de emisiones contaminantes;
- VI. Reducir, bajo condiciones de viabilidad económica, la generación de emisiones contaminantes en la generación de energía eléctrica;
- VII. Apoyar el objetivo de la Ley General de Cambio Climático, relacionado con las metas de reducción de emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y de generación de electricidad provenientes de fuentes de energía limpia;
- VIII. Promover el aprovechamiento sustentable de la energía en el consumo final y los procesos de transformación de la energía;
- IX. Promover el aprovechamiento energético de recursos renovables y de los residuos, y
- X. Las obligaciones establecidas en el artículo anterior deberán ser homologadas a los productos consumidos en el territorio nacional, independientemente de su origen [3].

Otra ley importante es la Ley General de Cambio Climático, que establece las disposiciones para enfrentar los efectos del cambio climático y también promueve “la transición hacia una

economía competitiva, sustentable, de bajas emisiones de carbono y resiliente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos asociados al cambio climático” [57].

3.4.2 ESCENARIO Y METAS ACTUALES

La Ley de Transición Energética de 2015 [3] dicta las siguientes metas mínimas de generación de electricidad por parte de energías limpias para los distintos años que se muestran (ver Figura 3.5), las cuales son las mismas a las propuestas por la LAERFTE:



Figura 3.5 Metas de generación de energía eléctrica limpia 2018 – 2024, Ley de Transición Energética 2015

Sin embargo, según los datos publicados en los PRODESEN 2019 y 2022 [58], [59], estas metas no se cumplieron, puesto que para 2018 se tuvo una aportación del 23.18% y para 2021 fue de 29.5%.

En febrero de 2020, se publicó “el acuerdo por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética” [60], en donde la Secretaría de Energía aprueba la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios. En este acuerdo se dictan nuevas metas, las cuales se muestran en la Figura 3.5:

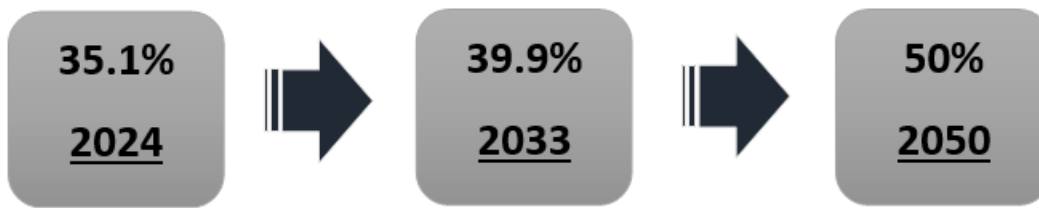


Figura 3.6 Metas de generación de energía eléctrica limpia 2024 – 2050, Acuerdo 2020

La transición energética en México debe darse no sólo por la presión del agotamiento de los recursos fósiles sino por el impacto que causan al medio ambiente y a la salud. La transición del sector eléctrico aún no cumple con el mínimo de las metas establecidas, por lo que se deben usar las distintas herramientas que se tienen como lo son la modernización de las redes eléctricas, el uso a gran escala de las tecnologías renovables y la aplicación de Generación Distribuida.

Para lo anterior, siempre se deben tener en cuenta las limitaciones que se tienen como lo es la geografía y el potencial de las energías renovables; sin embargo, México aún cuenta con grandes potenciales para la producción de electricidad con diversas tecnologías renovables. Sólo queda encontrar respuestas a los distintos retos que existen para su incorporación.

En suma, tener una correcta transición energética ayuda al cumplimiento de los objetivos que las Naciones Unidas ha planteado para que todos y todas tengan un mejor futuro. Ya sea teniendo electricidad constante para las diversas necesidades que cubre este recurso o la disminución de contaminantes en la producción de energía eléctrica para tener una mejor calidad de vida reduciendo los riesgos de mortalidad y morbilidad que están asociados a la quema de combustibles fósiles.

CAPÍTULO 4

CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La Tierra se encuentra envuelta por una capa gaseosa llamada atmósfera, ésta se encuentra dividida en cinco subcapas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera. Los gases que componen la atmósfera son diversos; sin embargo, se destacan el nitrógeno y el oxígeno por ser los que se hallan en mayor porcentaje. La atmósfera tiene funciones esenciales, dado que sirve para proteger la Tierra de la radiación que emite el Sol y ayuda a la regulación del clima del planeta [61], [62].

Los gases por los que está compuesta la atmósfera son producidos y descompuestos por distintos procesos naturales, lo que hace que la atmósfera se encuentre en equilibrio. El nitrógeno, el cual representa aproximadamente el 78% del volumen total de la atmósfera cercana a la superficie de la Tierra, es retirado de la atmósfera sobre todo por las bacterias que lo descomponen en la tierra y océanos, mientras que es producido por microorganismos al degradar la materia orgánica [63], [64].

Por otro lado, el oxígeno es eliminado de la atmósfera cuando se combina con otras sustancias mediante un proceso de oxidación, por la degradación de la materia orgánica y por la respiración de los seres vivos y a la vez es producido mediante el proceso de fotosíntesis [63].

La atmósfera además de tener en ella nitrógeno y oxígeno contiene otras sustancias en menor proporción, las cuales pueden ser producidas por fuentes de origen natural o antropogénicas [63], muchas de ellas pueden ser dañinas por lo que son consideradas como contaminantes. La contaminación atmosférica se puede definir como: “[...] la presencia de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para personas, medio ambiente y demás bienes” [65].

Sin duda, los impactos que surgen a partir de la contaminación atmosférica deben ser disminuidos para mejorar la vida humana y el medio ambiente. En México las personas tienen derecho a un medio ambiente sano en donde tengan bienestar y un buen desarrollo. En el artículo

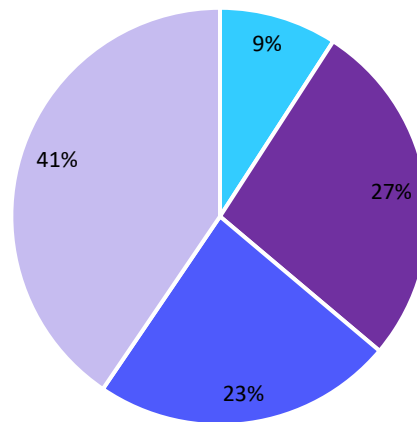
tres de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos también dice que el Estado será el responsable de garantizar dicho derecho [66].

En este sentido, para mejorar la calidad del aire es necesario conocer las fuentes de donde provienen los contaminantes y el volumen producido por las mismas para la toma de decisiones que favorezcan al medio ambiente y a las personas. Por ello, México ha elaborado el Inventario Nacional de Emisiones (INEM), donde se cuantifican los contaminantes según su tipo y su origen. Actualmente, se cuentan con cuatro inventarios, siendo el de 2016 el más reciente, por lo que será el inventario que se analizará a continuación.

El INEM se divide principalmente en cuatro tipos de fuentes:

- Fuentes fijas: son aquellas que se encuentran en un punto fijo como centrales eléctricas o fábricas.
- Fuentes móviles: son todos los vehículos de transporte que generan emisiones contaminantes debido a su operación.
- Fuentes de área: se refiere a aquellas fuentes pequeñas que se encuentran en gran cantidad y están dispersas y que en conjunto producen emisiones grandes y dañinas.
- Fuentes naturales: fenómenos naturales como la generación de emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales

En la Figura 4.1, se tienen las emisiones nacionales por tipo de fuente que se presentaron en el año 2016, se puede observar que el mayor número de emisiones se dio debido a las fuentes naturales, en segundo lugar, las fuentes móviles, le siguen las fuentes de área y por último las fuentes fijas.



■ Fuentes fijas ■ Fuentes móviles ■ Fuentes de área ■ Fuentes naturales

Figura 4.1 Emisión nacional de contaminantes por fuente, elaboración propia con datos del INEM 2016

4.1 TIPOS DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Existen diferentes tipos de contaminantes en la atmósfera, en donde la emisión de cada uno dependerá de la actividad o fenómeno que ocurra. El INEM 2016 cuantificó siete tipos de contaminantes, los cuales fueron elegidos porque la mayoría son contaminantes criterio. En este sentido, se entiende como contaminantes criterio a “aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población” [67]. En seguida, se presentan los contaminantes criterio antes mencionados en la Figura 4.2.

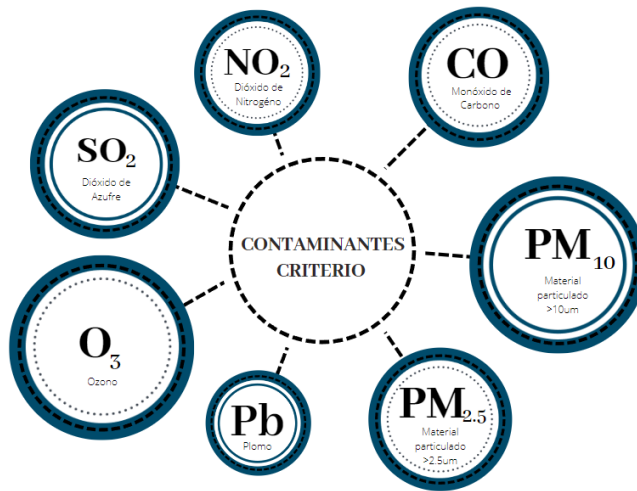


Figura 4.2 Contaminantes criterio, elaboración propia con datos de PROAIRE ZMVM 2021

A continuación, se describen los contaminantes reportados en el INEM 2016:

SO₂ – DIÓXIDO DE AZUFRE

Es un gas tóxico que es arrojado a la atmósfera en gran porcentaje por fuentes antropogénicas, esta sustancia es producida por la quema de combustibles fósiles que poseen azufre, como el petróleo y el carbón. La mayor parte de este contaminante proviene de las plantas generadoras de energía, también es emitido por fuentes naturales, dado que se crea en emisiones volcánicas [65], [68].

CO – MONÓXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono se presenta cuando existe la combustión de alguna sustancia que tenga carbono, como es el caso de los hidrocarburos, ya que cuando es quemado a veces no se cuenta con el suficiente oxígeno para que se forme CO₂ (dióxido de carbono). El origen del CO principalmente se da por actividades humanas, en específico el transporte [65].

NO_x – ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Son un grupo de gases que tienen en su estructura oxígeno y nitrógeno, se forman a partir de la oxidación del nitrógeno que se encuentra en la atmósfera. Los NO_x son siete compuestos, sin embargo, el único que se regula es el NO₂ (bióxido de nitrógeno), ya que es el que emite una mayor

cantidad por actividades relacionadas al ser humano de todos los óxidos de nitrógeno [69]. En la Tabla 4.1 se muestra la familia de los NO_x.

| Fórmula | Nombre | Valencia del Nitrógeno | Propiedades |
|--|---|------------------------|---|
| N ₂ O | óxido nitroso | 1 | gas incoloro soluble en agua |
| NO N ₂ O ₂ | óxido nítrico bióxido de dinitrógeno | 2 | gas incoloro ligeramente soluble en agua |
| N ₂ O ₃ | trióxido de dinitrógeno | 3 | sólido negro, soluble en agua, se descompone en agua |
| NO ₂ N ₂ O ₄ | bióxido de nitrógeno tetraóxido de dinitrógeno | 4 | gas café rojizo, muy soluble en agua, se descompone en agua |
| N ₂ O ₅ | pentóxido de dinitrógeno | 5 | sólido blanco, muy soluble en agua, se descompone en agua |

Tabla 4.1 Óxidos de Nitrógeno, EPA 1999

COV – COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Estos compuestos se hallan en estado gaseoso, poseen una alta volatilidad a temperatura y presión ambiente y son emitidos por determinados sólidos o líquidos. Los COV están constituidos por diversas sustancias químicas orgánicas, estas sustancias se encuentran en una gran variedad de productos como lo son barnices, cosméticos, productos de limpieza, etc. Los compuestos orgánicos son liberados mientras se usan dichos productos, cuando existe la quema de combustibles y de forma natural [70].

PM - MATERIAL PARTICULADO

El material particulado es una mezcla de partículas diminutas y gotas líquidas que se encuentran alojadas en el aire, éstas son generadas por diversos compuestos químicos orgánicos, ácidos, humo y polvo. El PM puede producirse de forma directa e indirecta, se produce de forma directa cuando es emitida por fuentes como el humo proveniente de incendios agrícolas o mediante el polvo que existe cuando los vehículos circulan en caminos no pavimentados, la forma indirecta es cuando el material particulado es generado a partir de otros contaminantes como los NO_x, COV y SO₂ [71].

El PM se categoriza dependiendo del tamaño de la partícula:

- $PM_{2.5}$

El material particulado fino es aquel que tienen un diámetro menor a $2.5 \mu m$, el tiempo de vida que tienen en la atmósfera varía de días a semanas. Éstas son removidas de la atmósfera principalmente en gotas de lluvia gracias a que este tipo de partículas son muy solubles. Antes de que sean retiradas de la atmósfera pueden ser trasladadas a miles de kilómetros [72].

- PM_{10}

El PM_{10} o también llamado material particulado grueso poseen un diámetro menor a $10 \mu m$, disponen de un tiempo de vida corto, ya que va de minutos a horas, debido a su tamaño tienen una menor distancia de traslado respecto al material particulado fino. La remoción de estas partículas se da por precipitación [72].

En la Figura 4.3 se observan las fuentes antropogénicas, que representan el 59% del total de emisiones contaminantes reportadas en el INEM 2016, las fuentes móviles son las de mayor emisión, sobresaliendo el CO (monóxido de carbono), los NO_x (óxidos de nitrógeno) y los COV (compuestos orgánicos volátiles). Los principales contaminantes de las fuentes de área son el CO, los COV y el NH_3 (amoníaco). Por último, se encuentran las fuentes fijas, en donde el SO_2 (dióxido de azufre) es el mayor contaminante, le siguen los NO_x y en tercer lugar se encuentra el CO.

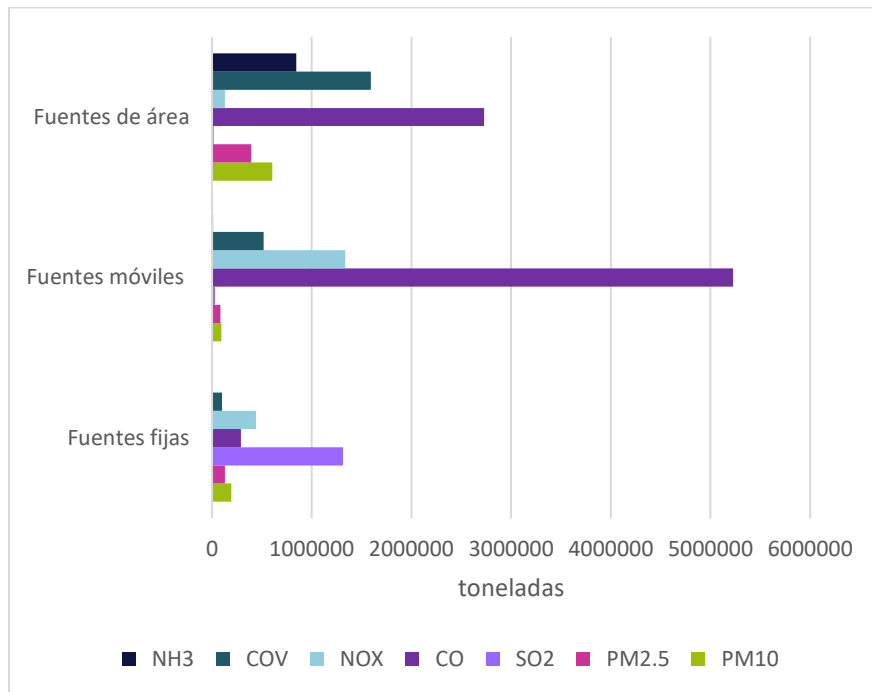


Figura 4.3 Contaminantes de origen antropogénico, elaboración propia con datos del INEM 2016

4.2 IMPACTOS EN LA SALUD

Los impactos en la salud que se tienen debido a la contaminación atmosférica son relevantes, ya que se considera como una gran amenaza para la salud de los humanos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) [73] calculó que cada año la contaminación del aire provoca siete millones de muertes prematuras y también provoca morbilidades que causan que se pierdan años de vida saludable.

Este tipo de contaminación afecta a todos. Los niños pueden tener afectaciones en la función pulmonar, infecciones respiratorias y asma, mientras que en los adultos se observan las dos causas de muerte más comunes atribuibles a la contaminación del aire: la cardiopatía isquémica y los accidentes cerebrovasculares [73].

Por otro lado, el Instituto para la Métrica y Evaluación de la Salud (IHME), por sus siglas en inglés, [74] calculó los principales 10 factores de riesgo del aumento en la probabilidad de muerte y discapacidad en México. Este estudio fue realizado para el año 2019 y en él se muestra a la contaminación del aire como el noveno factor de riesgo; sin embargo, la contaminación del aire es el primer factor de riesgo cuando se toman únicamente los riesgos ambientales.

En la figura 4.4 se observan los principales factores de riesgo, los cuales explican la tendencia de muerte y discapacidad en México, estos riesgos se encuentran divididos en: metabólicos, ocupacionales/ambientales y conductuales.

- Los riesgos metabólicos son aquellos trastornos en donde existen reacciones químicas irregulares que interrumpen procesos físicos y químicos necesarios para tener un cuerpo sano.
- Cuando se habla de riesgos conductuales se refiere a las acciones que toma un individuo y que si se dan de forma repetida durante periodos largos afectan su salud.
- Por último, los riesgos ocupacionales son los riesgos que tienen las personas en su trabajo, mientras que los riesgos ambientales involucran daños debido a la contaminación del aire o agua, a las temperaturas no deseables, etc.

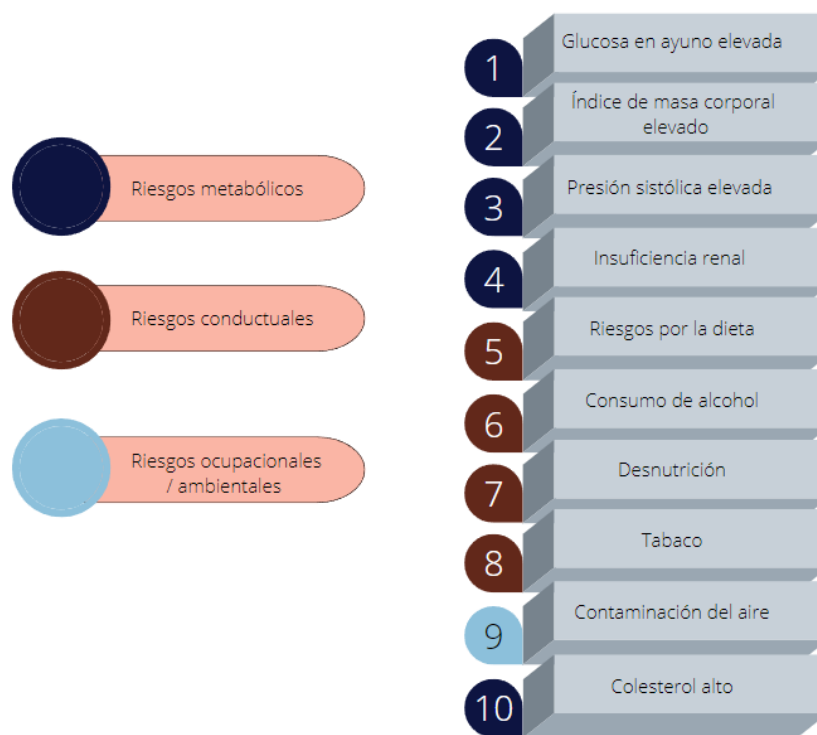


Figura 4.4 Principales factores de riesgo, elaboración propia con datos del IHME 2019

Los efectos y la intensidad de los daños asociados a la contaminación del aire dependerán de distintas variables como:

- Las concentraciones en las que se encuentra el contaminante
- Las propiedades físicas y químicas del contaminante
- El tiempo de exposición
- Características de la población

A continuación, se describen los impactos en la salud de algunos contaminantes criterio:

IMPACTO CAUSADO POR SO₂

Se tiene evidencia que el dióxido de azufre ocasiona diversos daños a la salud, ya que se ha notado un incremento de muertes humanas por enfermedades crónicas de origen cardiovascular y respiratorio, este contaminante puede ocasionar irritación en ojos y garganta, daño en las funciones pulmonares, debido a que puede crear una contracción en los bronquios, los cuales son dos vías aéreas que vienen de la tráquea y van hacia los pulmones, uno al derecho y otro al izquierdo [75], [76].

IMPACTO CAUSADO POR CO

Cuando se tiene una exposición permanente al monóxido de carbono éste se combina con la hemoglobina, la cual es una proteína que se encuentra en los eritrocitos, que cumple la tarea de trasladar el oxígeno de los pulmones al resto del cuerpo [77]. Si el CO y la hemoglobina se combinan se forma carboxihemoglobina que disminuye la capacidad del traslado del oxígeno en la sangre. Los síntomas al estar intoxicado con CO dependen del nivel de carboxihemoglobina que se tenga, si se encuentra entre el 10 al 30% se manifiesta con dolores de cabeza y mareos, por arriba del 30% permanecen los dolores de cabeza, pero con mayor fuerza y por arriba del 40% existe un riesgo de coma o hasta la muerte [78].

IMPACTO CAUSADO POR NO₂

Aunque existen estudios en donde se muestra que a mayor nivel de NO₂ mayor aumento en las enfermedades respiratorias no se ha podido dividir la relación, dado que “[...] en la mayoría de las ciudades existe una alta correlación entre niveles de varios contaminantes que provienen de fuentes similares, en particular por emisiones vehiculares con PM_{2.5} y NO₂. Esto dificulta la estimación del efecto de cada contaminante de manera independiente” [78].

IMPACTO CAUSADO POR MATERIAL PARTICULADO

Para el material particulado grueso (PM₁₀) se ha observado que, la exposición a este contaminante afecta las vías respiratorias e incrementa la mortalidad cuando existen concentraciones altas [79]. Las PM₁₀ se encuentran asociadas al riesgo de mortalidad por:

- Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
- Enfermedades cardiopulmonares
- Infarto cerebral

El material particulado fino (PM_{2.5}) causa un mayor daño a la salud debido a su tamaño, ya que le permite entrar a los alvéolos que son la parte más profunda del sistema respiratorio [80]. Los efectos en la salud que causa este contaminante son:

- Variabilidad en la frecuencia cardiaca
- Incremento en la mortalidad
- En niños asmáticos existe un aumento en sibilancias, que es un sonido que ocurre durante la respiración y se da por la obstrucción de las vías respiratorias
- Inflamación de las vías aéreas

IMPACTO CAUSADO POR Pb

Cuando se ingiere o inhala polvo del plomo, parte del veneno puede permanecer en el cuerpo y causar serios problemas de salud, como: daño renal y/o auditivo, problemas de comportamiento y atención, afectaciones en la inteligencia de los niños, lentitud en el crecimiento corporal y anomalías en los fetos [75].

4.2.1 NORMATIVIDAD

Con el objetivo de proteger la salud pública debido a todos los problemas que causan algunos contaminantes a la salud se tienen establecidos estándares publicados por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Sin embargo, organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda umbrales para dichos contaminantes. A continuación, se muestra la Tabla 4.2 la comparación de los límites que se tienen en México y los recomendados por la OMS.

| Contaminante | Tiempo | Valor límite | | |
|---|---------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|
| | | NOM* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | OMS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| Dióxido de azufre (SO ₂) | 1 hr. | NOM-022-SSA1-2010 | 196.5 | 40 |
| | 24 hrs. | | 104.8 | |
| Monóxido de carbono (CO) | 1 hr. | NOM-021-SSA1-1993 | 30,000 | |
| | 8 hrs. | | 10,000 | |
| Dióxido de nitrógeno (NO ₂) | 1 hr. | NOM-023-SSA1-1993 | 200 | 10 |
| | anual | | 40 | |
| Ozono (O ₃) | 1 hr. | NOM-020-SSA1-2014 | 176 | 100 |
| | 8 hrs. | | 100 | |
| Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) | 24 hrs. | NOM-025-SSA1-2014 | 50 | 24 |
| | anual | | 20 | 15 |
| Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}) | 24 hrs. | | 25 | 15 |
| | anual | | 10 | 5 |
| Plomo (Pb) | anual | NOM-026-SSA1-1993 | 0.5 | |

*Se tomó el valor más bajo en las normas donde existe una disminución en la concentración por año.

Tabla 4.2 Valores límites de concentraciones NOM y OMS

Los umbrales de las NOMs son mayores a los estipulados por la OMS, como es el caso del PM_{2.5} en donde el valor límite de la concentración promedio diaria es de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la OMS establece un valor de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto es preocupante, debido que las normas mexicanas tienen límites más altos y aun así estos no se cumplen, ya que en el Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019 [81] se muestra que muchas de las ciudades y zonas metropolitanas no cumplen con estos límites.

En la Figura 4.5 se condensan los contaminantes criterio que fueron evaluados en el Informe Nacional de la Calidad del Aire del año 2019 [81], en estos resultados se observa que muchas ciudades no cumplen las NOMs y que no todas pudieron ser evaluadas, dado que no se tuvieron suficientes datos o las estaciones de monitoreo no se encontraban en operación.

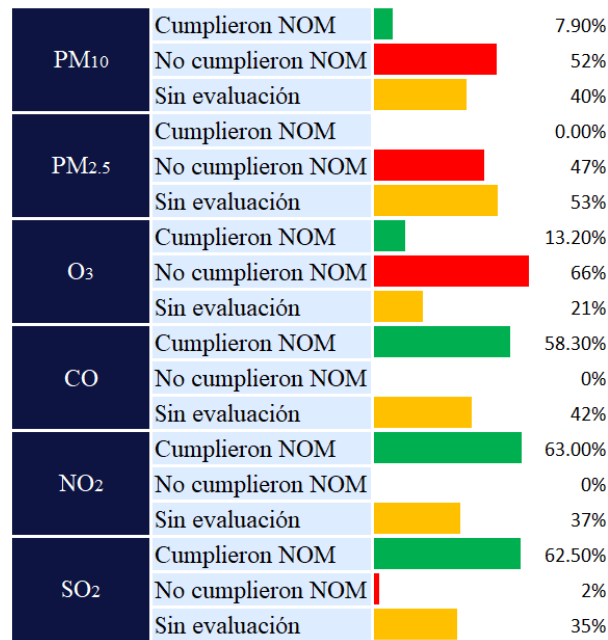


Figura 4.5 Porcentaje de cumplimiento de NOMs en ciudades y zonas metropolitanas, elaboración propia con datos del Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019

4.3 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Como se ha dicho con anterioridad, la producción de generación de energía eléctrica causa emisiones de diferentes contaminantes atmosféricos. La producción de electricidad aportó el 3.9% del total de emisiones por todas las fuentes reportadas en el INEM 2016. Siendo el SO₂ el de mayor aportación, el SO₂ derivado de la generación de energía es el 50% de todo el SO₂ nacional emitido. En segundo lugar, se encuentran los NO_x que representan el 6.7% del total de NO_x. Luego se encuentra el CO que a pesar de ser el tercer contaminante con más toneladas a partir de la producción de electricidad únicamente es el 0.8% del CO total. Finalmente, se tiene el material particulado, en donde el PM₁₀ equivale al 5.9% y el PM_{2.5} el 4.8% referente a las emisiones totales del respectivo contaminante (ver Figura 4.6).

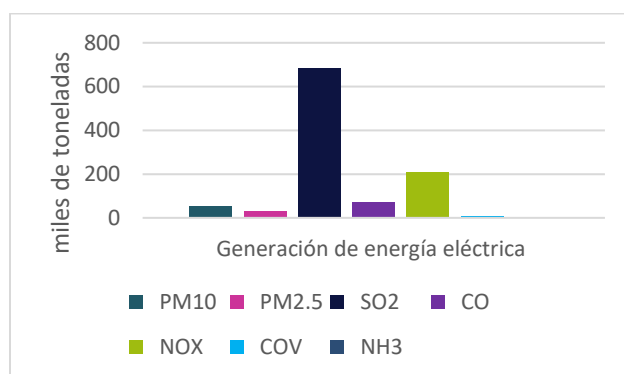


Figura 4.6 Emisiones derivadas de la generación de electricidad, elaboración propia con datos del INEM 2016

Analizando las emisiones reportadas en el INEM 2016 se obtienen las nueve categorías que más aportan a la contaminación por PM_{2.5} al ambiente a nivel nacional, las cuales son enlistadas a continuación en un orden de mayor a menor:

- Agropecuarias
- Fuentes misceláneas
- Quema de combustibles en fuentes estacionarias
- Carreteras
- Alimentos y bebidas
- Generación de energía eléctrica
- Fuentes industriales ligeras y comerciales
- Metalúrgica
- Petróleo y petroquímica

Dado lo anterior, se puede observar que la generación de energía eléctrica se encuentra en el puesto número seis, recalcando que únicamente se trata de un contaminante, en este caso, del material particulado fino (PM_{2.5}).

La cantidad y el tipo de contaminantes emitidos a la atmósfera varían según la actividad y el combustible que se utilice, en la Tabla 4.3 se muestran los contaminantes que son emitidos a la atmósfera debido a la producción de energía eléctrica según el tipo de combustible usado.

| Combustible | Contaminantes | |
|---------------------------|--|---|
| Carbón | Compuestos orgánicos volátiles Monóxido de Carbono Óxidos de Nitrógeno Amoníaco | Dióxido de Azufre Material particulado Plomo |
| Petróleo | Compuestos orgánicos volátiles Monóxido de Carbono Óxidos de Nitrógeno Amoníaco | Dióxido de Azufre Material particulado Plomo |
| Gas Natural | Compuestos orgánicos volátiles Monóxido de Carbono Óxidos de Nitrógeno Amoníaco | Dióxido de Azufre Material particulado Plomo |
| Combustión interna | Compuestos orgánicos volátiles Monóxido de Carbono Óxidos de Nitrógeno | Amoníaco Dióxido de Azufre Material particulado |

Tabla 4.3 Contaminantes atmosféricos debido a la generación de electricidad, elaboración propia con datos del Emission Inventory Improvement Program 2001

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA

Existen diferentes tipos de metodologías para calcular el impacto que se tiene en la salud debido a los contaminantes atmosféricos, para lograr una estimación es necesario delimitar cuál o cuáles contaminantes se van a analizar para evaluar el impacto y también qué se va a entender como impacto, dado que se puede medir evaluando el daño en la salud, ya sea por tipo de enfermedad o por la mortalidad que causan los diferentes contaminantes.

5.1 METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES

Como se vio en el capítulo anterior, está demostrado que ciertos contaminantes atmosféricos dañan la salud de las personas, causando en ellas diferentes enfermedades y hasta la muerte.

El efecto que tienen los contaminantes atmosféricos en la salud humana depende de diversas variables. Hablando en específico de la contaminación generada por la producción de electricidad, algunas de las variables a tomar en cuenta son las siguientes:

- Ubicación de las plantas generadoras de energía eléctrica
- Tipo de tecnología de la planta generadora
- Número de personas expuestas a las emisiones contaminantes
- Cantidad de contaminación proveniente de la generación de energía
- Tiempo de exposición a los distintos contaminantes generados por las plantas

Para la evaluación del impacto en la salud es esencial tener la cuantificación de las emisiones provenientes de las centrales de generación eléctrica. Las emisiones de las plantas eléctricas son del tipo conducidas, ya que generalmente poseen chimeneas por donde se descargan las emisiones de todos los contaminantes producidos después de la combustión, lo que hace que la cuantificación de las emisiones puedan ser medidas de forma directa o indirecta [82].

El método directo de la medición de emisiones se refiere al muestreo en la fuente, en donde se necesitan equipos de medición especiales y personal calificado para la realización de los

procedimientos de muestreo. Este método es preciso; sin embargo, los costos para su realización son elevados. El equipo de muestreo puede ser manual o automático, siendo el automático el de mayor confiabilidad debido a que el monitoreo se da de forma continua por lo que se cubren periodos de muestreo más extensos [82].

Según el Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019 [81] para realizar mediciones mediante muestreo México cuenta con 36 Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA), instalados en 30 estados siendo Quintana Roo y Baja California Sur las entidades faltantes. Todos los SMCA tienen en total 241 estaciones de muestreo distribuidas en ciudades y zonas metropolitanas. Lo que se obtiene de estas estaciones de muestreo son parámetros meteorológicos: dirección del viento, humedad relativa y velocidad del viento, y de igual manera, las concentraciones de los siguientes contaminantes:

- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- Ozono (O₃)
- Material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀)
- Dióxido de azufre (SO₂)

La información obtenida de cada SMCA dependerá de la estación que se quiera analizar; debido a que no todas cuentan con la misma infraestructura. Es importante mencionar, que estas concentraciones ambientales son provenientes de todas las fuentes; fijas, móviles, de área y naturales.

Por otra parte, el cálculo de emisiones mediante el método indirecto se hace por medio de factores de emisión o cálculos de balance de masa, a continuación, se describen ambos métodos:

Los factores de emisión relacionan la cantidad de contaminantes emitidos con la actividad de la fuente emisora. Un ejemplo para las unidades de un factor de emisión para la generación de energía eléctrica es el cociente de la masa del contaminante y la generación de energía eléctrica (ej. tonelada/MWh). Los factores de emisión relacionados a la producción de electricidad dependerán de variables como: el tipo de combustible utilizado en la planta eléctrica, el volumen de combustible quemado, las características del combustible, las características de la tecnología, entre otras.

El balance de masa estima las emisiones a partir de una igualdad en donde se dice que la masa del contaminante será igual a la diferencia entre las entradas y salidas; las entradas son consideradas como la materia prima junto con los materiales de consumo indirecto, mientras que las salidas son los productos que se tienen al final de un proceso [82].

Se debe agregar que la obtención de las concentraciones para los contaminantes atmosféricos es importante, puesto que muchos de los estudios que evalúan los impactos en la salud por la contaminación atmosférica hacen uso de la concentración que tienen diversos contaminantes. La concentración se puede definir como:

La cantidad de una sustancia, en términos de masa o de volumen, en relación con el medio que la contiene. Puede ser expresada en partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb), o bien en unidades de masa de la sustancia por volumen que la contiene, como g/m^3 [82].

La concentración puede ser obtenida usando el método directo, al usar equipos en las centrales eléctricas para conseguir la concentración de los contaminantes y con ello tener la contribución de las emisiones de la planta eléctrica a la concentración ambiental total. Otra forma de obtener la concentración de contaminantes es el uso de modelos de simulación, en donde se utilizan una gran cantidad de variables para poder aproximar los procesos atmosféricos los cuales son complejos.

Existen diferentes tipos de modelos para la simulación de la calidad del aire, uno de estos modelos es el determinista en el que las concentraciones se cuantifican con la ayuda de simulaciones de procesos atmosféricos, con este modelo se puede evaluar la fracción perteneciente de la planta eléctrica que contribuye a las concentraciones ambientales de cierta área [11].

Las simulaciones de la calidad del aire son muy detalladas porque dependen de muchos factores como la topografía del lugar, donde se consideran las características del terreno, el uso del terreno y su altura. Se requieren parámetros de las fuentes emisoras como: el diámetro y altura de la chimenea, temperatura, velocidad y flujo de escape, también se añaden patrones espaciales y temporales de las emisiones, en donde se calculan los procesos de transporte y el tiempo que permanecen en la atmósfera antes de su remoción, propiedades físicas y químicas del contaminante a analizar y; por último, se necesitan factores de tipo meteorológicos como la temperatura, los

campos de viento, la humedad, entre otros [11]. En la Figura 5.1 se enlistan algunos de los factores utilizados en modelos atmosféricos.

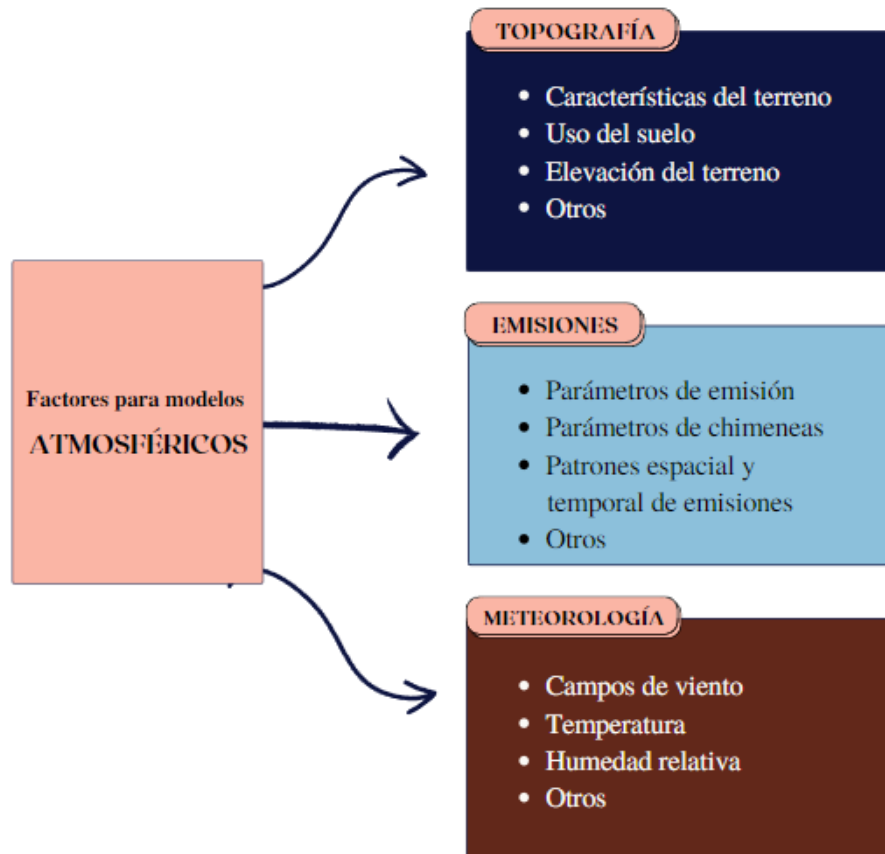


Figura 5.1 Factores para modelos atmosféricos, elaboración propia con información de SEMARNAT-INE 2006

Hay una variedad de metodologías y herramientas computacionales para lograr obtener una simulación de la calidad de aire. El grado de detalle y exactitud dependerá de la información y recursos que se tengan.

5.2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL IMPACTO EN LA SALUD HUMANA DEBIDO A LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Para hacer la evaluación del impacto en la salud por la generación de electricidad con energía fósil en México se siguieron distintos pasos. Primero, se planteó el problema, el cual se desarrolló a partir de los ODS, en específico, la meta 3.9 que, como se mencionó anteriormente, se refiere a la

reducción considerable en el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la polución y contaminación del aire para el año 2030.

Por consiguiente, se adaptó la meta 3.9 al sector eléctrico y se tomó la decisión de elegir la contaminación del aire como variable para el cálculo del impacto en la salud, esto debido a que existen antecedentes en donde se utiliza la contaminación del aire para evaluar este tipo de impacto.

Para lograr el cumplimiento del objetivo de esta tesis se decidió tomar un enfoque cuantitativo, dado que se busca estimar el daño en la salud causado por la contaminación atmosférica debido a la generación de energía eléctrica en una población que habita en una determinada zona geográfica durante un periodo [83].

Teniendo en cuenta lo anterior, se delimitó que se obtendría el impacto en la salud calculando el número de muertes que ocasiona cada tecnología de generación de electricidad con energía fósil en México a causa del material particulado fino ($PM_{2.5}$) que producen dichas plantas. También, se definió que el cálculo del número de muertes se generaría para cada estado de la República Mexicana.

Posteriormente, se hizo una recolección de datos con los que se determinó una expresión matemática que estima los impactos en la salud humana debidos a la generación de electricidad con energía fósil en México. Por último, utilizando el número de muertes estimadas para cada estado se hizo una valoración económica del impacto generado haciendo uso del valor de una vida estadística.

En la Figura 5.2 se observan los pasos utilizados para la realización de la estimación del impacto en la salud humana a causa de la generación de electricidad en México.

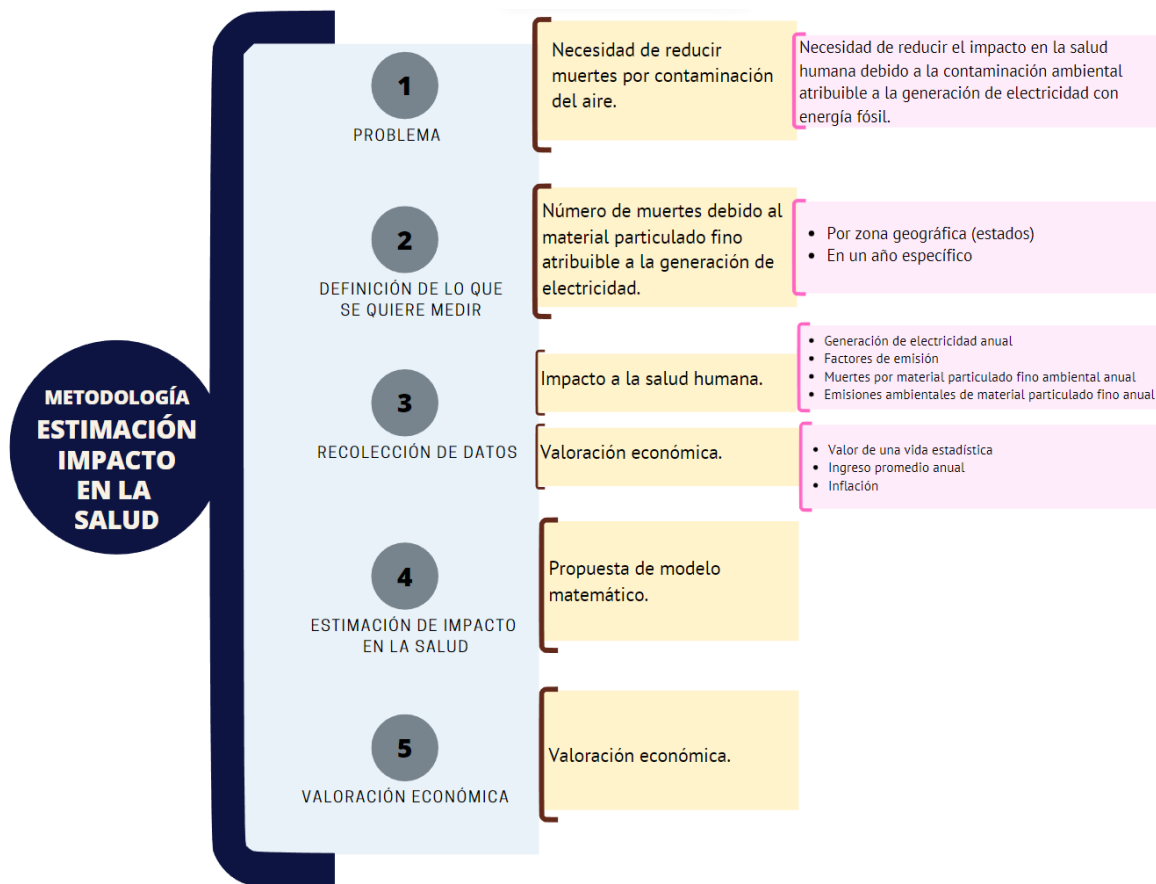


Figura 5.2 Metodología para la estimación del impacto en la salud humana a causa de la generación de electricidad

5.3 BASE DE DATOS PARA LA CREACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

5.3.1 IMPACTO EN LA SALUD HUMANA

EMISIONES CAUSADAS POR LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON ENERGÍA FÓSIL

Como se dijo anteriormente, las emisiones provenientes de la generación de energía eléctrica pueden calcularse de forma directa o indirecta. Dado que el objetivo de esta tesis es determinar el impacto en la salud que ocasionan todas las plantas de generación de energía eléctrica que usan energía fósil en México, se descartó el cálculo por la forma directa, puesto que no existen equipos de medición para cada una de las plantas y de igual forma existe una escasez de información para la implementación de modelos de calidad del aire. Es por esto por lo que se optó por la forma indirecta, haciendo uso de factores de emisión.

• Elección de contaminante

Como se vio en el capítulo 4, las plantas eléctricas son fuentes de emisión y éstas lanzan diferentes contaminantes dependiendo de la tecnología y el tipo de combustible que use. Para hacer el cálculo de las emisiones de cierta actividad, primero se debe determinar el tipo de contaminantes que se quiere cuantificar.

Dicho lo anterior, para este trabajo se decidió que únicamente se evaluarán las muertes por material particulado fino ($PM_{2.5}$) provenientes de las plantas de generación de electricidad a partir de energía fósil, esto debido a que el material particulado (fino y grueso) son considerados como los contaminantes atmosféricos más peligrosos para la salud de las personas, siendo el material particulado fino aún más peligroso que el grueso por su capacidad de adentrarse hasta los alvéolos [84].

Por consiguiente, se concluye que el $PM_{2.5}$ es una opción adecuada para evaluar el impacto a la salud por contaminación atmosférica, ya que existe evidencia concreta acerca de los efectos que causan en la salud y se puede decir que el incremento en la mortalidad y morbilidad a causa de la exposición de este contaminante es superior a todos los demás, por lo que es importante su análisis.

• Factores de emisión

Los factores de emisión usados para el cálculo de las emisiones debidas a la generación de electricidad fueron los propuestos por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), los cuales se usaron para el desarrollo de la calculadora que estima *ex ante* externalidades asociadas a la generación de electricidad con base en la ubicación de la planta y el tipo de tecnología [2].

En la tabla 5.1 se muestran los factores de emisión utilizados en la calculadora del IMCO en donde se muestra el factor correspondiente al $PM_{2.5}$ según la tecnología de la planta eléctrica. Estos factores de emisión se obtuvieron mediante la emisión promedio que presentaron las plantas en operación en el año 2015 en el SEN.

| Tecnología | PM_{2.5} (t/MWh) |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Termoeléctrica convencional | 0.000437 |
| Turbogás | 0.000015 |
| Ciclo combinado | 0.000015 |
| Combustión interna | 0.000125 |
| Carboeléctrica | 0.00024 |

Tabla 5.1 Factores de emisión, elaboración propia con información de IMCO 2018

Con estos factores de emisión se obtienen las toneladas por cada MWh generado según el tipo de tecnología empleada, en la Tabla 5.1 se puede observar que el factor más grande corresponde a las termoeléctricas convencionales mientras que el menor pertenece al ciclo combinado y turbogás.

EMISIONES AMBIENTALES DE MATERIAL PARTICULADO FINO ANUAL

Para la obtención de las emisiones ambientales, las cuales se refieren a las emisiones que son arrojadas a la atmósfera por todos los tipos de fuentes, se usó la información proporcionada por el INEM 2016.

Los datos usados son producto de diversos pasos técnicos que usó el INEM para el desarrollo del inventario de emisiones, estos pasos fueron publicados en 1997 a través de la cooperación del Instituto Nacional de Ecología (INE), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Asociación de Gobernadores del Oeste (WGA) [85].

A continuación, se enuncian los pasos técnicos que fueron propuestos por el anterior documento señalado para la creación de un inventario de emisiones:

- I. Identificar el propósito de un inventario de emisiones
- II. Definir las características necesarias del inventario de emisiones
- III. Determinar las fuentes de datos para el inventario y seleccionar las técnicas y métodos de estimación de las emisiones
- IV. Recopilar datos relacionados con las emisiones y datos de actividad
- V. Calcular las estimaciones de emisiones
- VI. Aplicar la modelación necesaria
- VII. Aseguramiento de la Calidad

- VIII. Evaluar la racionalidad y la incertidumbre de los resultados de los inventarios de emisiones
- IX. Almacenamiento electrónico de datos
- X. Documentar resultados

MUERTES DEBIDAS AL MATERIAL PARTICULADO FINO AMBIENTAL

Para la obtención del número de muertes a causa del $PM_{2.5}$ producido por todas las fuentes, se hizo uso de la base de datos del Instituto para la Métrica y Evaluación de la Salud (IHME). El instituto utilizó modelos complejos, herramientas computacionales y gran cantidad de datos para obtener el impacto por $PM_{2.5}$ ambiental en la salud para 114 países, entre ellos México. Gracias a la información proporcionada por el IHME se obtuvo la cantidad de defunciones en un año para la población que habita en cada estado de la República Mexicana para todas las edades.

Para el cálculo del número de muertes como causa de las $PM_{2.5}$, el IHME utilizó las concentraciones promedio anuales medidas en las estaciones de monitoreo de material particulado fino, estimaciones de $PM_{2.5}$ por satélite, simulaciones mediante modelos químicos e información de la población.

El IHME creó curvas de riesgo en donde muestran el daño según la exposición del contaminante, para luego estimar qué cantidad de las enfermedades puede ser atribuible al $PM_{2.5}$ según la exposición que se tiene en un lugar. Las enfermedades evaluadas en este estudio son:

- Cardiopatía isquémica
- Accidentes cerebrovasculares (isquémico y hemorrágico)
- Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC)
- Cáncer de pulmón
- Infecciones respiratorias agudas bajas
- Diabetes tipo II
- Bajo peso al nacer
- Gestación corta

5.3.2 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático propuesto calcula el número de muertes que se tuvieron durante un año a causa de las diversas tecnologías de generación de electricidad con energía fósil que existen en México.

Para la creación del modelo matemático se utilizaron las variables mostradas en la Tabla 5.2, que fueron previamente analizadas.

| Variable | Abreviación | Unidad |
|---|--------------------|-------------------------|
| Generación de electricidad | GE | $\frac{MWh}{año}$ |
| Factores de emisión | FE | $\frac{toneladas}{MWh}$ |
| Emisiones ambientales de material particulado fino | EPM | $\frac{toneladas}{año}$ |
| Número de muertes por exposición al material particulado fino ambiental | MPM | $\frac{muertes}{año}$ |
| Muertes por generación de energía eléctrica por contaminación de material particulado fino | M | $\frac{muertes}{año}$ |

Tabla 5.2 Variables del modelo matemático

A continuación, se muestra el modelo propuesto, el cual calcula el impacto en la salud humana debido a la generación de energía eléctrica para cada tecnología j a nivel nacional en el año i . Esta expresión obtiene la porción de muertes debidas a la contaminación de $PM_{2.5}$ que se le puede atribuir a las emisiones por la producción de electricidad.

$$M\left(\frac{\text{muertes}}{\text{año}}\right) = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I FE_i\left(\frac{\text{toneladas}}{\text{MWh}}\right) * GE_{ij}\left(\frac{\text{MWh}}{\text{año}}\right) * MPM_j\left(\frac{\text{muertes}}{\text{año}}\right)}{EM_j\left(\frac{\text{toneladas}}{\text{año}}\right)}$$

Se decidió utilizar como año de análisis el 2016, dado que es el año en el que se puede encontrar la mayoría de información por estados más actual.

5.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En la evaluación económica se les otorga un valor monetario a todas las muertes derivadas de la generación de electricidad previamente calculadas, para ello se usó el valor de una vida estadística (VVE), que se puede definir como “[...] el valor que le otorga una sociedad a evitar la muerte de una persona no identificada dentro de la misma” [86].

Para obtener el valor monetario se usó la metodología propuesta por la SEMARNAT y el INE [11] con la que obtuvieron el valor económico de las muertes por la contaminación de PM_{2.5} arrojado por la central termoeléctrica ubicada en Tuxpan utilizado la siguiente ecuación:

$$IM_T\left(\frac{\$}{\text{año}}\right) = \sum (V_i\left(\frac{\$}{\text{caso}}\right) * \sum H_{ij}^j\left(\frac{\text{casos}}{\text{año}}\right))$$

Donde:

IM_T = impacto monetario total (en pesos por año)

H_{ij} = número de casos del indicador de impacto en la salud i
asociados al contaminante j

V_i = valor unitario del impacto i

Para el empleo de esta fórmula se tomó a i como el número de muertes atribuibles a la generación de electricidad con energía fósil, j hace referencia al material particulado fino y para el valor unitario del impacto se tomó el VVE.

5.4.1 VALOR DE UNA VIDA ESTADÍSTICA

El VVE usado en este trabajo fue el publicado por la SEMARNAT y el INE en 2017 en su informe “Estimación del valor de una vida estadística en México: un estudio de valoración

contingente” [87] en donde a partir de encuestas realizadas en 2014 se obtuvo que el valor estadístico de una vida en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es de \$2,031,102 MXN.

5.4.2 AJUSTE DE INFLACIÓN Y ZONA GEOGRÁFICA

Dado que el año analizado es el 2016 se hizo un ajuste de inflación al VVE utilizado, empleando la tasa de inflación del periodo de diciembre 2014 hasta diciembre 2016. Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [88] la tasa de inflación perteneciente a este periodo es de 5.56%, por lo que el VEE para la ZMVM en el año 2016 es de \$2,144,031 MXN.

Por último, se hizo un cambio al VEE para cada estado de la República Mexicana, dado que no todas las personas tienen el mismo ingreso, por lo que no todas pagarían lo mismo para evitar la muerte, dicho de otra forma, las personas con mayor ingreso están dispuestas a pagar una mayor cantidad de dinero para evitar el riesgo de mortalidad. Para esto se utilizaron los ingresos promedios anuales por estado de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 2016 junto con la siguiente ecuación recomendada por la SEMARNAT y el INE [87]:

$$VVE_B = VVE_A * \left(\frac{I_B}{I_A}\right)^{0.5}$$

Donde:

VVE_B = *valor de una vida estadística para la población B*

VVE_A = *valor de una vida estadística para la población A (de donde se obtuvo directamente el valor del VVE)*

I_B = *ingreso para la población B*

I_A = *ingreso para la población A*

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta, el objetivo principal es hacer notar el impacto que provoca la generación de electricidad mediante energía fósil. El impacto calculado se medirá a partir de la mortalidad obtenida según el tipo de tecnología utilizada en los diferentes estados del país, además de calcular el costo económico de dicho impacto.

6.1 IMPACTO EN LA SALUD

Como resultado de la implementación de la metodología descrita en el capítulo 5, se obtuvo el número de muertes para cada entidad federativa debido a la contaminación por material particulado fino derivado de la generación de electricidad con energía fósil para el año 2016, las tecnologías evaluadas fueron:

- Ciclo combinado
- Termoeléctrica convencional
- Carboeléctrica
- Turbogás
- Combustión interna

En la Tabla 6.1 se muestran los resultados, en donde se tiene el número de muertes según el estado y la tecnología de generación eléctrica. En esta tabla se observan los fallecimientos a nivel nacional atribuibles a la generación de energía eléctrica (519 muertes) para el año 2016, los cuales equivalen al 0.07% del total de decesos que se presentaron ese mismo año, este porcentaje puede compararse con el 0.62% que pertenece a las víctimas muertas a causa de accidentes de tránsito terrestre en el año 2017, con el 15.4% relacionado con las defunciones por diabetes mellitus y con el 0.9% referente al porcentaje de suicidios ocurridos en 2016, según datos del INEGI.

De la misma forma, se contemplan las entidades federativas con el mayor número de muertes; Coahuila, Estado de México, Guerrero, Veracruz e Hidalgo. En estas cinco entidades se concentra el 53.5% de todas las defunciones calculadas debidas a la generación de electricidad.

| Entidad federativa | Ciclo combinado | Termoeléctrica convencional | Carboeléctrica | Turbogás | Combustión interna | Total |
|---------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|------------|--------------------|--------------|
| Aguascalientes | - | - | - | - | - | - |
| Baja California | 9.4 | 14.9 | - | 0.5 | - | 24.8 |
| Baja California Sur | - | 5.3 | - | 0.1 | 4.4 | 9.7 |
| Campeche | 0.1 | 0.1 | - | - | - | 0.2 |
| Chiapas | - | - | - | - | - | - |
| Chihuahua | 3.5 | 9.8 | - | - | 0.1 | 13.4 |
| Ciudad de México | - | 6 | - | 2.5 | 2.4 | 10.9 |
| Coahuila | 0.8 | 0.8 | 61.2 | 0.1 | 0.1 | 63.1 |
| Colima | 2.1 | 17.4 | - | - | - | 19.5 |
| Durango | 1.1 | 3.9 | - | - | - | 5.1 |
| Estado de México | 3.4 | 51.4 | - | 2.5 | 1 | 58.2 |
| Guanajuato | 2.3 | 10.6 | - | 0.7 | 0.1 | 13.7 |
| Guerrero | - | - | 55.1 | - | - | 55.2 |
| Hidalgo | 0.7 | 46.4 | - | - | 0.1 | 47.2 |
| Jalisco | - | 0.6 | - | - | 0.2 | 0.8 |
| Michoacán | - | 1.8 | - | - | - | 1.8 |
| Morelos | 0.2 | - | - | - | - | 0.2 |
| Nayarit | - | - | - | - | - | - |
| Nuevo León | 12.2 | 4.3 | - | 0.4 | 1.2 | 18.2 |
| Oaxaca | - | 2.1 | - | - | - | 2.1 |
| Puebla | 1 | 0.6 | - | - | - | 1.6 |
| Querétaro | 1.3 | 0.9 | - | - | 0.3 | 2.6 |
| Quintana Roo | - | - | - | - | - | 0.1 |
| San Luis Potosí | 1.4 | 10.2 | - | - | 0.1 | 11.7 |
| Sinaloa | - | 15.3 | - | - | - | 15.3 |
| Sonora | 2.9 | 38.9 | - | - | 0.3 | 42.1 |
| Tabasco | - | - | - | 0.2 | - | 0.2 |
| Tamaulipas | 7.2 | 25.2 | - | 0.4 | 0.1 | 32.9 |
| Tlaxcala | 0.2 | - | - | - | - | 0.2 |
| Veracruz | 4.7 | 49.7 | - | 0.1 | 0.2 | 54.6 |
| Yucatán | 2.3 | 11.5 | - | - | - | 13.8 |
| Zacatecas | - | 0.6 | - | - | - | 0.6 |
| Total | 56.6 | 328.4 | 116.4 | 7.7 | 10.7 | 519.8 |

Los totales pueden no coincidir por redondeo.

Tabla 6.1 Número de muertes por entidad federativa y tecnología

Dada la gran aportación de los cinco estados mencionados, se analizará de forma individual cada uno de ellos. En primer lugar, se encuentra el estado de Coahuila, en el que se obtuvieron 63 muertes debido a la generación de electricidad para el año 2016, este estado generó el 47.9% de la energía eléctrica producida por las carboeléctricas del país, además de ser la principal fuente de producción de electricidad en este estado (ver Figura 6.1).



Figura 6.1 Estado de Coahuila, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2017

En segundo lugar, se encuentra el estado de México, en donde una de las variables importantes para este estado es la densidad de población, puesto que entre más personas expuestas en una región el impacto será de mayor magnitud (ver Figura 6.2).



Figura 6.2 Estado de México, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2017

El estado de Guerrero fue el tercer estado más afectado teniendo 55 muertes a causa de la generación de electricidad, en donde el 100% se dio a partir de la generación con carboeléctrica (ver Figura 6.3).

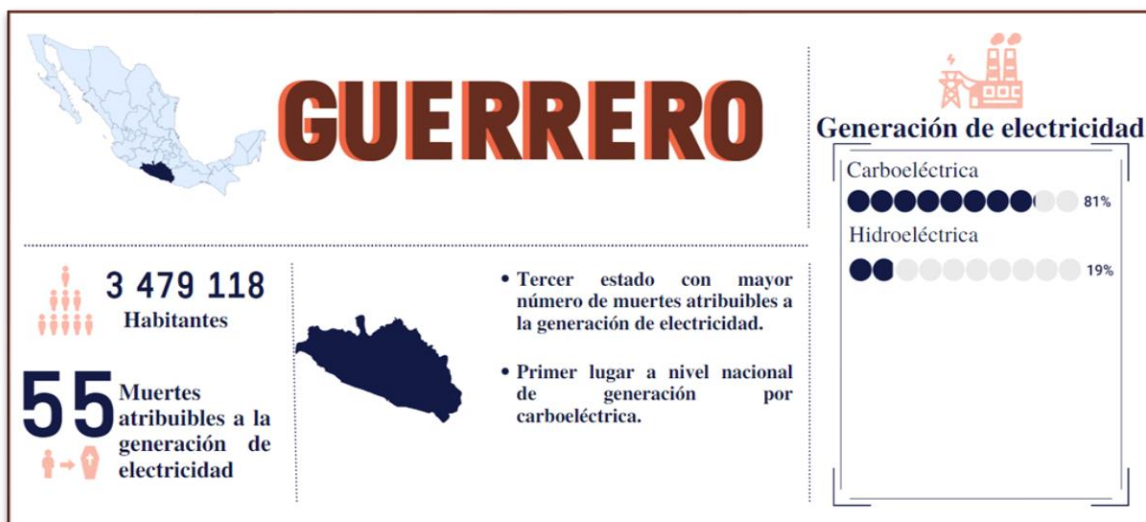


Figura 6.3 Estado de Guerrero, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2017

En cuarto lugar, se encuentra el estado de Veracruz, el cual tuvo una cantidad importante de generación por termoeléctrica convencional que representó el 17% del total generado por este tipo de tecnología a nivel nacional. Lo anterior es relevante, puesto que las termoeléctricas convencionales son las tecnologías con el mayor factor de emisión de PM_{2.5} (ver Figura 6.4).



Figura 6.4 Estado de Veracruz, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2017

Por último, se encuentra el estado de Hidalgo con 47 muertes, en donde casi todas son debido a la generación por termoeléctrica convencional. Este estado es el mayor generador de electricidad a partir de termoeléctricas, produce casi el 20% de toda la energía eléctrica generada por esta tecnología en todo el país. A pesar de tener una mayor cantidad de generación por termoeléctricas, el número de habitantes en Hidalgo es el menor de los cinco estados presentados (ver Figura 6.5).



Figura 6.5 Estado de Hidalgo, elaboración propia con información de INEGI y PRODESEN 2017

De forma general, la distribución de muertes en todo el país se da de la siguiente forma: el 63% de las muertes son debidas a la generación de electricidad con termoeléctrica convencional, en segundo lugar, se encuentra la carboeléctrica con un 22%, luego ciclo combinado representando el 11% y, por último, combustión interna y turbogás con un 2% cada una de ellas (ver Figura 6.6).

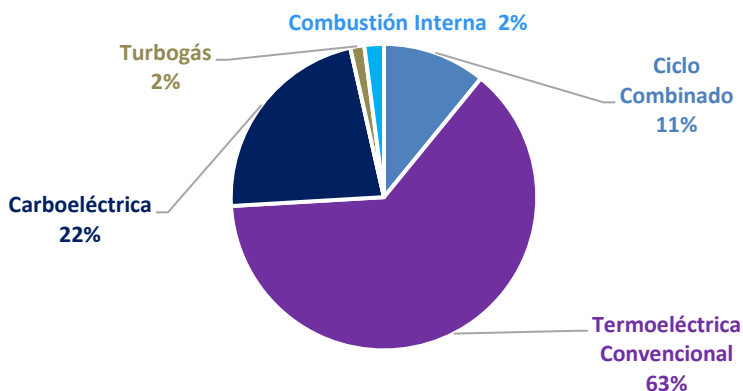


Figura 6.6 Porcentaje de mortalidad según la tecnología a nivel nacional

En síntesis, los estados más afectados son aquellos que poseen una gran generación con plantas carboeléctricas o termoeléctricas convencionales, esto se da debido a que el uso de estas tecnologías produce grandes cantidades de contaminantes, entre ellos, el material particulado fino, que como se ha dicho, es perjudicial para la salud humana. Otro aspecto importante que presentan las zonas con mayor número de muertes es que cuentan con una alta densidad de población.

6.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Retomando la publicación, mencionada en el capítulo 1 y 5, de la SEMARNAT e INE; “Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México” [11], en donde se presenta un estudio de caso en el cual se estimó el impacto en la salud y la valoración económica para la central termoeléctrica Adolfo López Mateos ubicada en Tuxpan, Veracruz, se observó que como resultado de dicho estudio se tuvo el número de muertes atribuibles a dicha central, evaluando únicamente la exposición de material particulado fino en adultos mayores a 30 años. Los resultados presentados en la publicación antes referida se lograron gracias a la siguiente ecuación:

$$H_{ij} = \beta_{ij} * R_i * C_i * N$$

Donde:

H_{ij} = número de casos del indicador de impacto en la salud i (muertes)
asociado con la concentración de contaminante j (material particulado fino)

β_{ij} = coeficiente concentración – respuesta

para el efecto i debido a la exposición del contaminante j

R_i = tasa de mortalidad de una población no asociada a la
contaminación del aire

C_i = concentración del contaminante j

N = población afectada

Los datos β_{ij} , R_i y N fueron obtenidos mediante el estudio de la Sociedad Americana del Cáncer, información de la Secretaría de Salud e INEGI, respectivamente, mientras que C_i fue el resultado de la modelación de calidad del aire, en donde se utilizaron diversas herramientas

computacionales. En primer lugar, se utilizó el modelo SCREEN3 con la que se determinó que la central de Tuxpan sí afecta la calidad del aire, por lo que se buscó una modelación más compleja y se recurrió al sistema CALMET-CALPUFF-MM5, el cual es un conjunto de modelos en el que se calcula la concentración del contaminante requerido utilizando información de la región a estudiar; topografía, meteorología, datos de viento, parámetros de la central, información de los contaminantes, etc. Esta información proviene de los mismos modelos y de distintas bases de datos.

Con la implementación de la formula anterior estimaron que la central termoeléctrica de Tuxpan con una capacidad de 2,100 MW causó 30 muertes en el año 2001.

Por otra parte, se analizó el impacto en la salud calculado para esta misma central utilizando el modelo propuesto visto en el capítulo 5. Para el año 2016 la termoeléctrica de Tuxpan reportó la misma capacidad instalada (2,100 MW) y se tuvieron 48 muertes a causa de la exposición por material particulado fino.

Como resultado, se tuvo que el número de muertes aumentó un 60%, lo que equivale a 18 muertes más en un lapso de 15 años para la misma central termoeléctrica. Este aumento en el impacto se puede dar por diversos factores, uno de ellos es el aumento de población en ese periodo, ya que entre más personas sean expuestas al contaminante atmosférico el daño en la salud pública será mayor, otra explicación es que para el estudio de 2001 únicamente se tomaron en cuenta los adultos mayores a 30 años mientras que en la metodología propuesta se consideran todas las edades.

6.4 VALORACIÓN ECONÓMICA

De la misma forma, se obtuvo el valor monetario que causaron las muertes estimadas atribuibles a la generación de energía eléctrica utilizando el valor de una vida estadística por cada entidad federativa. En la Tabla 6.2 se muestran los resultados, en donde se puede observar que el costo total, tomando en cuenta el número de muertes a nivel nacional que se tuvieron a causa de la generación de energía, fue de \$833,108,893MXN.

| Entidad federativa | Número de muertes | Ingreso promedio anual (MXN) | VVE (MXN) | Costo (MXN) |
|---------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|
| Aguascalientes | 0.0 | 61 189 | 1 639 744 | 0 |
| Baja California | 24.8 | 81 316 | 1 890 274 | 46 935 142 |
| Baja California Sur | 9.7 | 80 032 | 1 875 293 | 18 244 595 |
| Campeche | 0.2 | 57 476 | 1 589 204 | 319 059 |
| Chiapas | 0.0 | 27 241 | 1 094 071 | 8 065 |
| Chihuahua | 13.4 | 66 273 | 1 706 494 | 22 907 149 |
| Ciudad de México | 10.9 | 104 613 | 2 144 031 | 23 453 828 |
| Coahuila | 63.1 | 61 022 | 1 637 498 | 103 276 678 |
| Colima | 19.5 | 66 347 | 1 707 452 | 33 243 936 |
| Durango | 5.1 | 51 875 | 1 509 786 | 7 649 208 |
| Estado de México | 58.2 | 53 158 | 1 528 340 | 89 005 323 |
| Guanajuato | 13.7 | 69 251 | 1 744 414 | 23 908 792 |
| Guerrero | 55.2 | 35 575 | 1 250 284 | 68 954 402 |
| Hidalgo | 47.2 | 40 888 | 1 340 397 | 63 237 291 |
| Jalisco | 0.8 | 66 579 | 1 710 439 | 1 380 286 |
| Michoacán | 1.8 | 43 793 | 1 387 196 | 2 560 489 |
| Morelos | 0.2 | 56 272 | 1 572 471 | 301 142 |
| Nayarit | 0.0 | 57 853 | 1 594 407 | 58 270 |
| Nuevo León | 18.2 | 113 446 | 2 232 706 | 40 531 848 |
| Oaxaca | 2.1 | 35 443 | 1 247 963 | 2 666 555 |
| Puebla | 1.6 | 44 442 | 1 397 437 | 2 271 893 |
| Querétaro | 2.6 | 72 769 | 1 788 184 | 4 585 209 |
| Quintana Roo | 0.1 | 71 432 | 1 771 676 | 120 673 |
| San Luis Potosí | 11.7 | 50 342 | 1 487 308 | 17 419 981 |
| Sinaloa | 15.3 | 62 620 | 1 658 797 | 25 363 709 |
| Sonora | 42.1 | 80 653 | 1 882 551 | 79 287 465 |
| Tabasco | 0.2 | 47 556 | 1 445 579 | 250 723 |
| Tamaulipas | 32.9 | 66 693 | 1 711 892 | 56 238 117 |
| Tlaxcala | 0.2 | 39 960 | 1 325 104 | 232 631 |
| Veracruz | 54.6 | 44 513 | 1 398 554 | 76 425 020 |
| Yucatán | 13.8 | 54 787 | 1 551 582 | 21 397 033 |
| Zacatecas | 0.6 | 46 212 | 1 425 006 | 874 381 |
| Total | 519.8 | 1 911 616.1 | 51 246 133 | 833 108 893 |

Los totales pueden no coincidir por redondeo.

Tabla 6.2 Costo económico por entidad federativa y tecnología

Los cinco estados que representaron un mayor costo según el impacto estimado para el año 2016 fueron: Coahuila, Estado de México, Sonora, Veracruz y Guerrero. Las entidades antes mencionadas representan el 50% del costo total nacional obtenido. En la Figura 6.7 se observa el costo económico estimado según la entidad federativa.

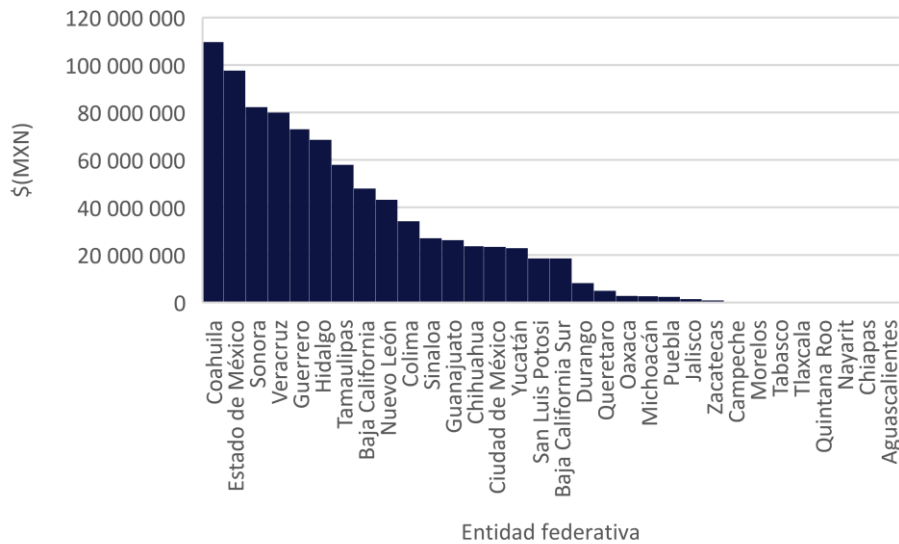


Figura 6.7 Costo económico

Aunado a lo anterior, en el año 2016 México tuvo un PIB de 17.7 billones de pesos mexicanos [89], el costo total del impacto en la salud obtenido representa el 0.005% del PIB. Sin embargo, los 833 millones calculados en la valoración económica del impacto en la salud por la generación de electricidad se pueden comparar con los 784 millones de pesos de la inversión estimada de la central fotovoltaica con una capacidad de 28 MW en el estado de Guerrero o los 560 mdp de inversión estimada para la central geotérmica ubicada en Jalisco con 25 MW, ambos para el año 2016 según información del micrositio de Permisos en materia de Generación de Energía Eléctrica [90].

6.3 CAMBIOS EN LA MATRIZ ENERGÉTICA

Para tener una evaluación del impacto a la salud considerando un cambio en la matriz energética se calcularon factores de mortalidad utilizando la información obtenida de la metodología propuesta, dichos factores estiman el número de muertes según los MWh generados dependiendo de la tecnología y el lugar en donde se encuentre la central.

En la Tabla 6.3 se muestran los factores de mortalidad que después se utilizaron para obtener el número de muertes atribuibles a la generación de energía reportada en el 2017, se eligió este año dado que es la información más reciente que se puede obtener de forma desagregada.

| Entidad federativa | Muertes/MWh | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|-----------|--------------------|
| | Ciclo combinado | Termoeléctrica convencional | Carboeléctrica | Turbogás | Combustión interna |
| Aguascalientes | | | | | |
| Baja California | 0.0000007 | 0.0000198 | | 0.0000007 | 0.0000057 |
| Baja California Sur | | 0.0000078 | | 0.0000003 | 0.0000022 |
| Campeche | 0.0000002 | 0.0000002 | | | 0.0000013 |
| Chiapas | | | | | |
| Chihuahua | 0.0000002 | 0.0000069 | | 0.0000002 | 0.0000020 |
| Ciudad de México | | 0.0001224 | | 0.0000042 | 0.0000350 |
| Coahuila | 0.0000002 | 0.0000068 | 0.0000037 | 0.0000002 | 0.0000019 |
| Colima | 0.0000002 | 0.0000058 | | | 0.0000017 |
| Durango | 0.0000001 | 0.0000040 | | 0.0000001 | 0.0000012 |
| Estado de México | 0.0000012 | 0.0000341 | | 0.0000012 | 0.0000097 |
| Guanajuato | 0.0000003 | 0.0000101 | | 0.0000003 | 0.0000029 |
| Guerrero | | | 0.0000031 | | 0.0000016 |
| Hidalgo | 0.0000002 | 0.0000059 | | 0.0000002 | 0.0000017 |
| Jalisco | | 0.0000090 | | 0.0000003 | 0.0000026 |
| Michoacán | | 0.0000073 | | 0.0000003 | 0.0000021 |
| Morelos | 0.0000007 | | | 0.0000007 | 0.0000061 |
| Nayarit | | | | | 0.0000041 |
| Nuevo León | 0.0000008 | 0.0000229 | | 0.0000008 | 0.0000066 |
| Oaxaca | | 0.0000054 | | | 0.0000015 |
| Puebla | 0.0000003 | 0.0000092 | | | 0.0000026 |
| Querétaro | 0.0000003 | 0.0000099 | | 0.0000003 | 0.0000028 |
| Quintana Roo | | | | 0.0000003 | 0.0000026 |
| San Luis Potosí | 0.0000002 | 0.0000047 | | | 0.0000013 |
| Sinaloa | | 0.0000056 | | 0.0000002 | |
| Sonora | 0.0000003 | 0.0000081 | | 0.0000003 | 0.0000023 |
| Tabasco | | | | 0.0000003 | |
| Tamaulipas | 0.0000002 | 0.0000069 | | 0.0000002 | 0.0000020 |
| Tlaxcala | 0.0000004 | | | 0.0000004 | |
| Veracruz | 0.0000002 | 0.0000071 | | 0.0000002 | 0.0000020 |
| Yucatán | 0.0000004 | 0.0000129 | | 0.0000004 | 0.0000037 |
| Zacatecas | | 0.0000042 | | | |

Tabla 6.3 Factores de mortalidad

Analizando las atribuciones que se tuvieron en el año 2016 y 2017 de las diferentes tecnologías a nivel nacional se puede observar (ver Figura 6.8 y 6.9) que la matriz energética no tuvo un cambio considerable, dado que sólo hubo una disminución en la tecnología carboeléctrica en un 2%, mientras que las tecnologías de combustión interna y bioenergía y cogeneración eficiente creció 1% cada una de ellas.

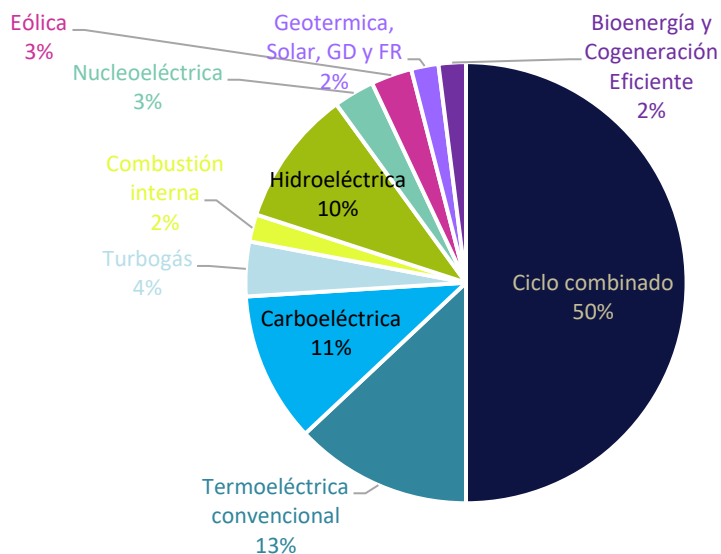


Figura 6.8 Generación de electricidad por tipo de tecnología año 2016, elaboración propia con datos de PRODESEN 2017

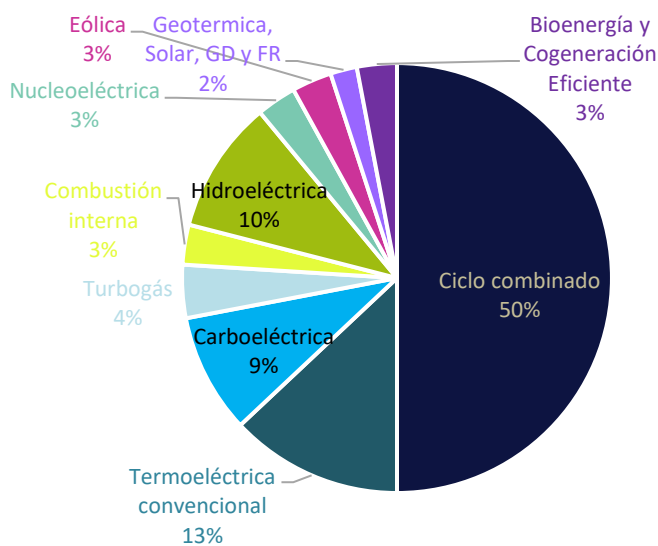


Figura 6.9 Generación de electricidad por tipo de tecnología año 2017, elaboración propia con datos de PRODESEN 2018

Utilizando los factores de mortalidad calculados y la generación por estado publicada en el PRODESEN 2018 [15] se obtuvo el número de muertes que causó la generación de energía eléctrica para el año 2017, el cual fue de 487 fallecimientos. En la Tabla 6.4 se muestra la mortalidad estimada para cada estado.

| Entidad federativa | Número de muertes | Ingreso promedio anual (MXN) | VVE (MXN) | Costo (MXN) |
|---------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|
| Aguascalientes | 0.0 | 63 549 | 1 793 676 | 0 |
| Baja California | 21.1 | 78 087 | 1 988 296 | 41 885 576 |
| Baja California Sur | 9.9 | 85 210 | 2 076 998 | 20 617 044 |
| Campeche | 0.1 | 56 124 | 1 685 644 | 198 465 |
| Chiapas | 0.0 | 27 450 | 1 178 862 | 0 |
| Chihuahua | 13.2 | 67 940 | 1 854 614 | 24 449 827 |
| Ciudad de México | 12.8 | 103 516 | 2 289 255 | 29 356 734 |
| Coahuila | 48.3 | 63 489 | 1 792 831 | 86 617 696 |
| Colima | 26.2 | 67 771 | 1 852 310 | 48 528 985 |
| Durango | 6.0 | 51 173 | 1 609 575 | 9 686 250 |
| Estado de México | 10.6 | 54 354 | 1 658 843 | 17 659 284 |
| Guanajuato | 23.4 | 59 144 | 1 730 396 | 40 443 651 |
| Guerrero | 56.0 | 35 067 | 1 332 414 | 74 564 389 |
| Hidalgo | 60.6 | 43 929 | 1 491 304 | 90 372 408 |
| Jalisco | 0.7 | 69 160 | 1 871 192 | 1 402 501 |
| Michoacán | 1.2 | 47 276 | 1 547 067 | 1 922 031 |
| Morelos | 0.3 | 53 970 | 1 652 976 | 466 192 |
| Nayarit | 0.0 | 58 503 | 1 721 003 | 69 885 |
| Nuevo León | 28.3 | 97 131 | 2 217 529 | 62 652 587 |
| Oaxaca | 1.9 | 36 614 | 1 361 482 | 2 599 159 |
| Puebla | 1.8 | 43 820 | 1 489 448 | 2 674 470 |
| Querétaro | 2.8 | 72 596 | 1 917 106 | 5 397 860 |
| Quintana Roo | 0.1 | 71 297 | 1 899 885 | 152 687 |
| San Luis Potosí | 16.0 | 51 982 | 1 622 247 | 26 021 167 |
| Sinaloa | 22.9 | 64 818 | 1 811 507 | 41 462 835 |
| Sonora | 40.7 | 78 063 | 1 987 993 | 81 002 120 |
| Tabasco | 0.2 | 47 055 | 1 543 455 | 238 601 |
| Tamaulipas | 29.0 | 64 695 | 1 809 784 | 52 481 679 |
| Tlaxcala | 0.2 | 42 209 | 1 461 824 | 246 994 |
| Veracruz | 43.0 | 42 213 | 1 461 882 | 62 827 963 |
| Yucatán | 9.8 | 56 829 | 1 696 189 | 16 549 538 |
| Zacatecas | 0.0 | 44 991 | 1 509 228 | 0 |
| Total | 487.1 | 1 900 023.8 | 54 916 816 | 842 548 577 |

Tabla 6.4 Resultados 2017, impacto en la salud y valoración económica

Para la valoración económica del impacto en la salud obtenido para el año 2017 se empleó la metodología descrita en el capítulo cinco, en donde se hace uso del valor de una vida estadística. En cuanto al ingreso promedio anual, se utilizó el ingreso promedio publicado por el INEGI en sus Encuestas Nacionales de Ingresos y Gastos de los Hogares 2016 y 2018 [91], [92] para así obtener una tasa de crecimiento anual y hacer el cálculo del año 2017. Por otra parte, se consideró el ajuste por inflación en donde se utilizó la inflación reportada por el INEGI [88] de 2014 a 2017 (12.71%).

Dados los datos anteriores se hace notar que el cambio en la participación de las tecnologías de generación eléctrica influye en el impacto en la salud, pues del 2016 al 2017 la generación por carboeléctrica tuvo un decremento del 2%, lo cual es relevante dado que ese porcentaje aumentó para tecnologías menos contaminantes y con ello una disminución en el número de muertes en un 6.3% equivalente a 33 fallecimientos anuales.

Respecto al costo económico, en el año 2016 se estimó un costo total de 833 108 893 pesos mexicanos y para 2017 \$842 548 577 MXN, existe una diferencia de aproximadamente 9.4 millones de pesos, siendo el 2017 el año con el mayor costo. Lo anterior indica que a pesar de tener menos muertes para el 2017 se tiene un mayor costo económico debido a la inflación.

CONCLUSIONES

APORTES

En esta tesis se construyó un modelo matemático que estima a nivel nacional el impacto en la salud debido a la contaminación atmosférica causada por la generación de energía eléctrica con energía fósil, además se realizó una valoración económica para dicho impacto. La información obtenida es relevante, dado que no existe un estudio que refleje a nivel nacional el daño ocasionado por la producción de electricidad. Esta investigación abre oportunidades a nuevas líneas de investigación o trabajos futuros como se detalla a continuación.

TRABAJOS FUTUROS

Emplear la metodología en el análisis de emisiones de un sistema eléctrico con menor participación de energía fósil para posteriormente realizar una comparación de resultados entre ambos sistemas.

Contar con una base de datos confiable, precisa y actualizada permitiría mejorar la metodología utilizada y en consecuencia se obtendrían mejores resultados y la posibilidad de usar los factores de mortalidad.

Adecuar la metodología empleada para su uso en otros sectores energéticos, puesto que el sector eléctrico no es la única industria que contamina ni la de mayor emisión de $PM_{2.5}$. Existen cinco industrias que emiten más material particulado fino, por lo que analizar los resultados podría resultar conveniente para la toma de decisiones a futuro en dichos sectores.

DISCUSIÓN

El impacto en la salud debido a la generación de electricidad con energía fósil para México en el año 2016 fue de 520 muertes, este cálculo se dio a partir de la metodología propuesta, en donde se calculó el número de muertes causadas por la exposición de material particulado fino producido por las plantas de generación eléctrica.

El cálculo se obtuvo tomando el total de muertes que se presentó en 2016 por la suma de material particulado fino de todas las fuentes, las emisiones totales de PM_{2.5} y las emisiones de material particulado fino de la generación de energía eléctrica.

Los datos obtenidos reflejaron que las tecnologías que utilizan energía fósil son dañinas para el ser humano y también se hizo notar que las tecnologías carboeléctrica y termoeléctrica convencional son las más perniciosas para la salud, puesto que el porcentaje de generación de ambas tecnologías fue del 24% siendo las causantes del 85% del total de muertes por generación de electricidad para el año 2016. Dicho lo anterior, sí existe una relación entre los fallecimientos por material particulado fino y la generación de energía eléctrica y esta relación será mayor o menor dependiendo de la tecnología que se utilice.

Los resultados arrojados por la metodología propuesta concuerdan con anteriores estudios, puesto que se ha demostrado que las tecnologías que utilizan energía fósil afectan la salud humana. Uno de los estudios que demuestra lo anterior es el de India, que se mencionó con anterioridad, en donde se calcularon 112 mil muertes anuales. El ejemplo de India es relevante por su gran dependencia de carboeléctricas en su matriz energética. Los resultados en esta tesis no muestran lo contrario, puesto que los dos únicos estados que generaron electricidad mediante plantas carboeléctricas se encuentran dentro de los tres estados más afectados.

CONCLUSIÓN FINAL

Las muertes por generación de energía eléctrica pueden parecer pocas, dado que equivalen al 0.007% del total de muertes registradas, sin embargo, es importante tener en cuenta que este cálculo se puede considerar como conservador, ya que únicamente se tomó en cuenta el daño de un contaminante y como impacto la mortalidad, por lo que no se estiman todas aquellas enfermedades que también causan los contaminantes atmosféricos.

Cabe señalar, que además de los impactos antes mencionados existen otros como lo son el daño en ecosistemas, en cultivos, los cambios de temperatura en la Tierra, los cuales desencadenan otros tipos de problemas como inundaciones y temperaturas extremas que dañan no sólo a las personas sino a los seres vivos que habitan en el planeta.

Todos estos problemas pueden disminuirse con ayuda de la transición energética, sin duda, la planeación de una matriz energética en donde se tenga un menor uso de tecnologías altamente contaminantes puede ser una solución.

La transición energética permitirá encaminar al país hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en donde si se disminuye el uso de tecnologías como la termoeléctrica convencional y la carboeléctrica se reducirán las muertes por el aire contaminado y se tendrá un sistema energético menos contaminante.

Finalmente, la reducción de tecnologías contaminantes debe darse con una buena planeación en donde se puedan aprovechar los potenciales renovables, innovar con tecnologías menos contaminantes, modernizar la red eléctrica, introducirse en la aplicación de la Generación Distribuida y tener un uso eficiente de la energía, sin embargo, es importante tener en cuenta que esto no puede cambiar de forma espontánea, sino que se requiere de tiempo y trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales , “Fuentes de Contaminación Atmosférica,” 2018.
- [2] Instituto Mexicano para la Competitividad, “Metodología para calcular ex ante externalidades asociadas a la generación de electricidad”.
- [3] *Ley de Transición Energética*, 2015.
- [4] Comisión Europea , 2005. [En línea]. <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/15/5265>
- [5] N. C. f. A. R. M. & M. M. Laboratory, “Weather Research and Forecasting Model,” [En línea]. Available: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>.
- [6] M. Gao, G. Beig, S. Song, H. Zhang, Hu, J. Hu y YingQi, “The impact of power generation emissions on ambient PM2.5 pollution and human health in China and India,” *ELSEVIER*, 2018.
- [7] M. Cropper, R. Cui, S. Guttikunda, N. Hultman, P. Jawahar, Y. Park, X. Yao y X.-P. Song, “The mortality impacts of current and planned coal-fired power plants in India,” *PNAS*, vol. 118, n° 5, 2021.
- [8] SEMARNAT, “Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México,” 2004.
- [9] SEMARNAT, “Revisión de metodologías utilizadas para la estimación de las externalidades,” 2003.
- [10] SEMARNAT, “Evaluación de externalidades ambientales del sector energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca,” 2007.
- [11] INE - SEMARNAT, “Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México,” 2006.
- [12] Banco Mundial, “Energía,” 13 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview#1>. [Último acceso: 24 03 2022].
- [13] Facultad de Ingeniería, [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/326/A4.pdf?sequence=>. [Último acceso: 25 03 2022].
- [14] I. Matulic, “Introducción a los Sistemas Eléctricos de Potencia,” vol. 2, 2003.

- [15] Secretaria de Energía, “PRODESEN 2018-2032,” 2018.
- [16] R. M. Meza Hernández, “Trabajos de mantenimiento a líneas de transmisión,” [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/7511/1/TRABAJOS%20DE%20MANTENIMIENTO%20A%20LINEAS%20DE%20TRANSMISI%C3%93N.pdf>. [Último acceso: 27 marzo 2022].
- [17] Secretaria de Energía, “El gobierno de México fortalece el SEN,” 2020. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/el-gobierno-de-mexico-fortalece-el-sistema-electrico-nacional>. [Último acceso: 20 03 2022].
- [18] Secretaria de Energía, “PRODESEN 2021-2035,” 2021.
- [19] SEMARNAT, “Semarnat.gob.mx,” octubre 2021. [En línea]. Available: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_ENERGIA03_05&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*. [Último acceso: 2022 marzo 25].
- [20] H. Ritchie y M. Roser, “Our World in Data,” 2020. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/energy>. [Último acceso: 2022 marzo 25].
- [21] “Ley de la Industria Eléctrica,” 2014.
- [22] Comisión Federal de Electricidad , “COPAR 2018 Generación,” 2018.
- [23] Comisión Federal de Electricidad, “Informe Anual 2020,” 2020.
- [24] Y. Cengel y M. Boles, Termodinámica, Mc Graw Hill, 2012.
- [25] Centro Nacional de Control de Energía, “Informe de la tecnología de generación de referencia,” 2020.
- [26] Centro Nacional de Control de Energía, “Informe de tecnología de generación de referencia”.
- [27] SEMAEDESO, “oaxaca.gob.mx,” [En línea]. Available: <https://www.oaxaca.gob.mx/semaedesos/energia-hidraulica/#:~:text=Tambi%C3%A9n%20conocida%20como%20energ%C3%ADa%20hidraulica,se%20agotan%20con%20su%20uso>.. [Último acceso: 28 marzo 2022].
- [28] I. P. o. C. C. (IPCC), “Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático,” 2011.

- [29] Comisión Federal de Electricidad, “CFE,” [En línea]. Available: <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/pages/historia.aspx#:~:text=%E2%80%8BLa%20generaci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa,f%C3%A1brica%20textil%20%22La%20Americana%22..>
- [30] Secretaria de Energía , “La evolución constitucional de la energía a partir de 1917,” 2016.
- [31] L. d. J. Ramos Gutiérrez y M. Montenegro Fragoso, “Las centrales hidroeléctricas en México pasado, presente y futuro,” *Tecnología y Ciencias del Agua* , vol. 3, n° 2, pp. 103-121, 2012.
- [32] M. d. I. P. Ramos Lara, “La compañía Mexican Light and Power Company Limited durante la revolución mexicana”.
- [33] Suprema Corte de la Justicia de la Nación , “Invalidez de las reformas hechas por el Ejecutivo Federal al Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica,” 2005.
- [34] E. de la Garza Toledo, J. Melgoza, L. de la Garza, E. Laviada, M. Trujillo , V. Sánchez, R. Corral y H. Amezcua , *Historia de la Industria Eléctrica en México*, 1994.
- [35] Ley que crea la Comisión Federal de Electricidad, 1937.
- [36] C. F. Escudero Martínez , *El costo social de la electrificación en el centro del país: la relocalización de Santo Tomás de los Plátanos y la construcción de la presa Santa Bárbara del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán 1947-1958*, 2015.
- [37] N. Sierra López, A. T. Romero Contreras y L. Zizumbo Villareal, “Desarrollo regional, electrificación y reorganización socioespacial en Valle de Bravo, México,” *Pueblos y fronteras digital* , vol. 7, n° 13, pp. 243-269, 2012.
- [38] Comisión Federal de Electricidad, “Informe de Actividades Realizadas, visita al Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán,” 2017.
- [39] D. Romo , “El campo petrolero Cantarell y la economía mexicana,” *Problemas del desarrollo* , 2015.
- [40] Comisión Nacional de Hidrocarburos, “Dictamen técnico del proyecto de explotación Cantarell,” 2013.
- [41] P. Linares, *La transición energética*, 2018.

- [42] Portal Académico, “Portal Académico CCH,” [En línea]. Available: <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad2/combustion/quees>. [Último acceso: 2022 06 07].
- [43] M. Gonzáles , E. Jurado, S. González, Ó. Aguirre , J. Jiménez y J. Navar, “Cambio climático mundial: Origen y consecuencias,” *Ciencia* , vol. VI, nº 3, 2003.
- [44] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, “Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático,” 2007. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>.
- [45] IPCC, “Resumen Técnico,” [En línea]. Available: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>.
- [46] G. Mengpin, J. Friedrich y L. Vigna, “WRI MÉXICO,” 02 septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://wrimexico.org/bloga/cuatro-gr%C3%A1ficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pa%C3%ADs-y-por>. [Último acceso: 01 junio 2022].
- [47] Organización Mundial de la Salud , “Organización Mundial de la Salud,” 30 octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20ya%20est%C3%A1,las%20zoonosis%20y%20las%20enfermedades>. [Último acceso: 14 junio 2022].
- [48] CEPAL, “Naciones Unidas,” [En línea]. Available: <https://www.cepal.org/es/temas/desarrollo-sostenible/acerca-desarrollo-sostenible>. [Último acceso: 09 junio 2022].
- [49] Naciones Unidas, “Naciones Unidas ODS,” [En línea]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/7_Spanish_Why_it_Matters.pdf.
- [50] Comisión Estadística , “unstats.un.org,” [En línea]. Available: https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework_A.RES.71.313%20Annex.Spanish.pdf. [Último acceso: 15 junio 2022].
- [51] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, “Gobierno de México,” 06 junio 2014. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/que-es-la-generacion-distribuida-estados-y-municipios>. [Último acceso: 14 junio 2022].
- [52] CEPAL, “Recursos Naturales y Desarrollo 209,” 2021.

- [53] “Programa Sectorial de Energía 2001-2006,” 2002.
- [54] D. Oficial, “Programa Sectorial de Energía 2007-2012,” 2008.
- [55] D. Oficial, “Programa Sectorial de Energía 2013 - 2018,” 2013.
- [56] “Programa Sectorial de Energía 2020 - 2024,” 2020.
- [57] “Ley General de Cambio Climático,” 2012.
- [58] SENER , “PRODESEN 2019 - 2033”.
- [59] SENER , “PRODESEN 2022 - 2036”.
- [60] “ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética.,” 2020.
- [61] IPCC, 2018, “Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial”.
- [62] S. d. M. A. y. R. Naturales, “La atmósfera, esencial para el mantenimiento de la vida,” 11 agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/atmosfera>. [Último acceso: 2022 junio 27].
- [63] Ministerio de educación ciencia y tecnología, “La atmósfera,” [En línea]. Available: <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002316.pdf>. [Último acceso: 01 julio 2022].
- [64] Environmental Protection Agency, “EPA,” [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-oxido-nitroso#:~:text=Las%20emisiones%20naturales%20de%20N,ultravioleta%20o%20las%20reacciones%20qu%C3%ADmicas..> [Último acceso: 02 julio 2022].
- [65] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, “miteco.gob,” [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/>. [Último acceso: 2022 julio 09].
- [66] “Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos,” 1917.
- [67] Comisión Federal para la protección contra riesgos sanitarios , “Gobierno de México,” 31 diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente#:~:text=Los%20contaminantes%20criterio%20son%20aquellos,el%20bienestar%20de%20la%20poblaci%C3%B3n..> [Último acceso: 15 junio 2022].

- [68] Gobierno de la ciudad de México , “calidad del aire,” [En línea]. Available: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27Y6BhnmKkYw==%27>. [Último acceso: 20 julio 2022].
- [69] E. P. A. (EPA), “Óxidos de Nitrogéno (NOx) ¿Por qué y cómo se controlan?,” 1999.
- [70] EPA, “El impacto de los compuestos orgánicos volátiles en la calidad del aire interior,” [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/cai/el-impacto-de-los-compuestos-organicos-volaticos-en-la-calidad-del-aire-interior>. [Último acceso: 26 julio 2022].
- [71] Servicio de Conservación de Recursos Naturales , “Calidad del aire,” 2014.
- [72] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales , “Programa de gestión para mejorar la calidad del aire (PROAIRE) de la zona Metropolitana del Valle de México,” 2021.
- [73] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Organización Mundial de la Salud,” 22 septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution#:~:text=Se%20calcula%20que%20cada%20a%C3%B1o,de%20a%C3%B1os%20de%20vida%20saludable..> [Último acceso: 26 julio 2022].
- [74] Instituto para la Métrica y Evaluación de la Salud (IHME), “IHME,” [En línea]. Available: <https://www.healthdata.org/mexico?language=149>. [Último acceso: 01 agosto 2022].
- [75] Instituto Nacional de Salud Pública, “Contaminación ambiental y sus efectos sobre la salud,” n° 6, 2010.
- [76] Centros para el Control y Prevención de Enfermedades, “UNIDAD 1: REVISIÓN DE LA ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA PULMONAR”.
- [77] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, “Hemoglobina,” *Boletín Científico* , vol. 1, n° 2, 2013.
- [78] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, “Contaminación atmosférica,” [En línea]. Available: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/estudios/383/contatmo.html>. [Último acceso: 28 julio 2022].
- [79] Instituto Nacional de Salud Pública, “Contaminación atmosférica y salud en la zona metropolitana del valle de México,” 2016.
- [80] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, “Partículas en suspensión,” [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/particulas.aspx>. [Último acceso: 23 julio 2022].

- [81] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, “Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019,” 2019.
- [82] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, “Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas,” 2013.
- [83] R. Hernandez-Sampieri, Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cuatitativa y mixta, McGRAW-HILL INTERAMERICANA, 2018.
- [84] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Efectos de las cuarentenas y restricciones de actividades relacionadas con el COVID-19 sobre la calidad del aire en las ciudades de América Latina, 2020.
- [85] Radian International LLC, “Manuales del programa de inventarios de emisiones de México,” 1997.
- [86] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, “Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión,” 2016.
- [87] S. d. M. A. y. R. Naturales, “Estimación del valor de una vida estadística en México: un estudio de valoración contingente,” 2017.
- [88] Instituto Nacional de Estadística y Geografía , 2022. [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/indicesdeprecios/calculadorainflacion.aspx>. [Último acceso: 26 agosto 2022].
- [89] I. N. d. E. y. Geografía. [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=17&vr=6&in=2&tp=20&wr=1>. [Último acceso: 26 septiembre 2022].
- [90] C. R. d. Energía, 25 julio 2016. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cre/acciones-y-programas/micrositio-de-permisos-en-materia-de-generacion-de-energia-electrica>. [Último acceso: 20 septiembre 2022].
- [91] I. N. d. E. y. Geografía, “INEGI,” [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2016/>. [Último acceso: 25 septiembre 2022].
- [92] I. N. d. E. y. Geografía. [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2018/>. [Último acceso: 27 septiembre 2022].