



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y  
APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS  
APLICADAS**

**ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD  
ENERGÉTICA DEL SECTOR TRANSPORTE EN  
MÉXICO AL 2050 MEDIANTE EL DESARROLLO DE  
UN MODELADO ENERGÉTICO**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**

**LEÓN FELIPE ADAME RIVERA**

**DIRECTOR: DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ**

**SINODALES: DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA, DR.  
ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ, DR. JESÚS CEREZO  
ROMÁN, DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ**

**CUERNAVACA, MORELOS**

**octubre 2021**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



Cuernavaca, Morelos, a 09 de septiembre de 2021.

**DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ**  
**COORDINADOR DEL POSGRADO**  
**EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: “Análisis De La Sustentabilidad Energética Del Sector Transporte En México Al 2050 Mediante El Desarrollo De Un Modelado Energético”, que presenta el alumno **León Felipe Adame Rivera**, para obtener el título de **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ		
DR. JESÚS CEREZO ROMÁN		
DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA		
DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ		
DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ		

**PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)**

**NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.**

DSJ\*MLGE/nmc.

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209.  
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6212 / correo: merle.garcia@uaem.mx





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**JESUS CEREZO ROMAN | Fecha:2021-09-09 14:57:58 | Firmante**

jr9wKRxVV+jyqG3d/xNj4hGjEJNchNyYYMvdfPvo4Z1BrDhqfF5iOcm4YolGWeyOvIAZ21wVHNWVM2FCiE+Nvtl8VmELK+DIP6lvMQepgyrsKf42WN1wsoxdAVj9uXW69AbHwGg  
b21gTUUtqAG1PSiULBO2S3NpbUiPkHcWeldeDkgGC8xPmG2BawKrQsHOE27ft7ZnXrwoDNiKViGOyXfSUTA3/50qdb5cncqgun2uzqws7gAj7O0/QmQwARTNZBP6NuL0cncao  
ZEKIBqoT7HXb9N2o1QkaaTYs1P5LnlmpXyvLvkvhbP38MV5Q8nBbEDjVzFHHAe01hGauXvV6g==

**ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMINGUEZ | Fecha:2021-09-09 16:08:43 | Firmante**

RBmQyr8jMys8PXx6sGV5bK615HoYhQ2LrYHjrMqIBa8nFUayyHj5QgvtMHD/57644RrBTnt+nVhwwBNrteUDJLRjkXd8f+XhU+5g5oEcPpJio3tZplm9HaONQGgXLhsECLmBgN  
lrKy1TYXSXrr7C+sW6hg0ZnQ+jLpfBhwU2csPFFSxTRisEeGM+KBP5XWIX7ftrfjJqIqHbyuq/ndk3JocJL/O8b4aQKPR14RnLRgMwH1RjxMLDF1WfRj8qHGPDuL1QklbQCal5  
eyPRbaakSvSnnv/8Y80H+QFL4Jh34A+DBMgsbSTnpp9WP3gePXqLrcaPpcvq1ZRIxjaQ==

**ANTONIO RODRIGUEZ MARTINEZ | Fecha:2021-09-09 16:39:06 | Firmante**

ISNIlf6EHm26e3dPh78lWC0il1/kBy2pSSUBQSF4x+GolgvcdJvPscv6NfzZMpiz+iCzB4dsQNTtHX753Fg1jCK/2p5wdw40ULktWNQu3rYtejTuFGx5zNgUZ2ed8ovJWIhkPFRtM  
Pg4ShySSWF8ZQ+zLPD07lv1IqU01fQDdmJqEyr5EpToYEoyGv8NIPdKLZaUtMqZTKY/NnJtQRXKPC3Rq46BgZ7I9AIYF/WWhMchAsJoXm0QRyU5aah0J2tGU7ILcz1vFQ00xhprpT  
RBAE8UPp0uLblcnpan1RAHjO+cbvjCHobeOvDKzb75MvLxbBiYWRhTN4xpL1VIGyyYg==

**MOISES MONTIEL GONZALEZ | Fecha:2021-09-09 18:01:42 | Firmante**

CNvu4a/KUo8VJWiXuOZfslqdvuvfxc43hHLchCkVwzXRPzBgRuL0vsm9LOaKYyh2Gawq/fG4DBI5tzvgol+oJ8DaBHBUtXoZa8dk4INCvkcxkYGB38ONyobQt1BWsfGJi2coeOfV  
VCIACZxsvlgPOjA8ln8a8wRgmuz/Eto+ZUSVld0WljOODEF3h9BgAF8HVh3DWO/eVZl44M+lyS39P44bGRRP+zvzHeUID39eDgDL+wAUoiAU2RRR0o6inJn1Gr7LebVb8qMleu  
T2y1VWgJhuZ7W26leCspfxTeLOWjfY0MPh+m8g1liEGq0YDO7rkgZHUVd1kKUmzvbDbw==

**GABRIELA HERNANDEZ LUNA | Fecha:2021-09-10 08:53:42 | Firmante**

hyoKqX4Aam5Ax59r8zzqvlN5upoWZwI+SG2Oe88nndmpoUv18yPaMjRhcCS0kBXy9weCxobWuBssn5POMVfHtqALBVkqplHGN0uG6k8DqE7kUq3R0w8P9UE0m8X6a4rhEKzf  
w3xtVzvW+Zz/IYJh6mC7wor9RLJSw7WiqRWASTzXMgV3lnX7IJuTLfcr5SODzIqvTwpnRja9w8zGkXjNfYvssM5y9K77Z45p0ROVaLa3XyMPgKgS8g4XDBFY+dwY2zh934lqjs  
32X8lv5DNPDicFoyyucZtPWuSpELW7pfQ0Ex17hUWMTmwz+gDPo9QielucN7pcMkd7afU+0Rw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



skTx7U

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/D2CxglQOXgk4QgJC2TF19K3zhb76TY>



## **Abstract**

The emission of CO<sub>2</sub> by anthropogenic processes is the greatest contributor to the phenomenon of Climate Change. This gas has various sources, however, at international level, the participation of the transport sector stands out, historically being 32% of total CO<sub>2</sub> emissions.

The platform Long-Term Energy Alternatives Planning (LEAP) was used to develop an energy analysis model. The methodology used was the transport stock rotation analysis, which allows calculating the energy demand of the sector and the CO<sub>2</sub> emissions generated. For the study, a baseline scenario was designed that is used to project data into the future under undisturbed conditions. Three more scenarios (electromobility, E15 bioethanol, improved performance) were designed in order to test different technologies and measures that serve to reduce emissions from the sector.

The resulting model proved to be useful both for testing hypotheses and also for reflecting a possible future outlook for the transportation sector in Mexico. The results obtained from the baseline scenario reflect that CO<sub>2</sub> emissions will continue to rise and the environmental goals of the Mexican State in terms of emissions will not be achieved.

## Resumen

En la actualidad diversas personalidades tanto académicas como políticas han denominado al Cambio Climático como la amenaza más grande que la humanidad tiene que afrontar. La emisión de CO<sub>2</sub> por procesos antropogénicos son el mayor contribuyente a dicho fenómeno. Dicho gas tiene diversas fuentes, sin embargo, a nivel internacional destaca la participación del sector transporte, siendo este rubro históricamente el 32% del total de emisiones de CO<sub>2</sub>, solo por debajo de los procesos de producción energética en los países.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo el desarrollo de un modelo de sustentabilidad energética del sector transporte de pasajeros y carga en México, teniendo como inicio y límite final de evaluación los años 2014 y 2050 respectivamente. Debido al limitado número de modelos energéticos del sector transporte en México se considera pertinente la creación de un nuevo modelo. La investigación contempla el sector de autotransporte por carretera, tanto de pasajeros como también de mercancía, dejando fuera del análisis los rubros de transporte aéreo, marítimo y ferroviario.

Para el desarrollo del modelo se empleo la plataforma de análisis energético Planificación de Alternativas Energéticas a Largo Plazo (LEAP, por sus siglas en inglés). La metodología empleada fue la de análisis de rotación de stock de transporte, la cual permite calcular la demanda energética del sector y las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas. Para el estudio se diseñó un escenario base que sirve para la proyección de datos a futuro en condiciones sin alterar. Tres escenarios más (electromovilidad, bioetanol E15, rendimiento mejorado) fueron diseñados con el fin de probar diferentes tecnologías y medidas que sirvan para la reducción de emisiones del sector.

El modelo resultante probó ser de utilidad tanto para la comprobación de hipótesis como también para representar un posible panorama a futuro del sector transporte en México. Los resultados obtenidos del escenario base muestran que las emisiones de CO<sub>2</sub> continuarán al alza y las metas ambientales del Estado Mexicano en materia de emisiones no serán logradas.

## **Agradecimientos**

En primera instancia, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada que permitió desarrollar mis estudios de maestría y la elaboración del presente trabajo de tesis.

A mis padres, por todo el amor, cariño e infinito apoyo que me han dado a lo largo de mi vida y que continúo recibiendo. Gracias Madre por ser un pilar de vida, inagotable fuente de amor, constante proveedora de buenos consejos y por siempre creer en mi potencial. Gracias Padre por la confianza y valores inculcados.

A mi hermana Berenice por siempre brindarme su apoyo, cariño y por siempre estar presente para escuchar mis inquietudes y constantes cuestionamientos.

Agradezco también a mi director de tesis, Dr. Antonio Rodriguez, tanto por su acertada guía como también por su paciencia. Asimismo, agradezco su constante impulso académico en mi formación que permitió un desarrollo satisfactorio de mi trabajo de investigación y de mis habilidades profesionales.

A mis sinodales, Dra. Gabriela, Dr. Cerezo, Dr. Romero por todo el tiempo dedicado y los conocimientos aportados en el presente trabajo de investigación.

Agradezco a todos mis docentes que han servido como guías para mi formación de maestría, también, a todo el personal administrativo del CIICAP por su buena labor, y en especial, a la Mtra. Merle García puesto que siempre estuvo presente para fungir como guía y apoyo, atendiendo siempre con amabilidad y cordialidad a lo largo de mi proceso formativo de maestría.

Doy gracias también a Charlie Heaps por permitir que su plataforma de modelación sea accesible para estudiantes y por haberme permitido extenderme en el uso de su *software*.

Obrigado Fayra por suas palavras de encorajamento, por suas palavras de amor e carinho durante todo esse tempo.

Finalmente, a mis amigos y compañeros de facultad, por todas las risas, buenos momentos y el apoyo que me brindaron a lo largo de este proceso.

## **Contenido**

Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	2
1.3. Hipótesis .....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo general .....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
Capítulo 2. Marco teórico .....	4
2.1. Sector energético en México .....	4
2.1.1. Sector transporte en México.....	6
2.1.2. Parque vehicular .....	8
2.1.3. Indicadores socioeconómicos y ambientales .....	11
2.1.4. Políticas energéticas y medioambientales en el sector transporte .....	13
2.2. Tipos de combustibles en el sector transporte .....	16
2.2.1. Gasolina.....	16
2.2.2. Combustibles alternativos.....	18
2.3. Modelos energéticos .....	29
2.3.1. Tipos de modelos energéticos .....	30
2.3.2. Plataformas de desarrollo .....	33
Capítulo 3. Sector transporte en México y plataformas de desarrollo para modelación .....	35
3.1. Información histórica del sector transporte .....	35
3.2. Definición de indicadores socioeconómicos y ambientales.....	38
3.3. Plataforma de desarrollo .....	42
3.3.1. Descripción de la plataforma.....	44
3.3.2. Descripción de módulos.....	45
Capítulo 4. Metodología.....	47
4.1 Componentes del escenario BAU.....	50
4.2 Escenarios de reducción de emisiones.....	52
4.2.1 Mejora en rendimiento del motor .....	52
4.2.2 Impulso en la electromovilidad.....	52



4.2.3 Uso de bioetanol E15 .....	52
Capítulo 5. Resultados.....	53
5.1. Variaciones del parque vehicular.....	53
5.2. Demanda energética.....	57
5.3. Emisiones de CO <sub>2</sub> del parque vehicular escenario BAU.....	59
5.4. Comparativo de resultados del escenario base .....	62
5.4.1 Comparativo de resultados del total del parque vehicular.....	62
5.4.2 Comparativo de resultados de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	63
5.5. Emisiones resultantes del bau y metas nacionales de reducción de CO <sub>2</sub> del sector transporte .....	64
5.6 Resultados De Los Escenarios De Reducción De Emisiones .....	64
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones .....	66
Referencias.....	69

## Lista De Tablas

Tabla 1. Consumo de energía en el sector transporte. Balance nacional de energía 2019 (SENERd,2018). .....	7
Tabla 2. Diferencias entre tipos de modelos. Elaboración propia con datos de Yasar., 2017.....	31
Tabla 3. Kilómetros Recorridos Por año. Elaboración Propia, Datos SENER (SENER-SIEd, 2020). .....	38
Tabla 4. Kilómetros recorridos por pasajero. Elaboración propia datos de SENER (SENER-SIEe, 2020). .....	39
Tabla 5. Toneladas-kilómetro Recorridos. Elaboración Propia Datos De SENER (SENER-SIEf, 2020). .....	39
Tabla 6. investigaciones realizadas que han empleado LEAP. Elaboración propia. ....	43
Tabla 7. Venta de vehículos, año 2014.....	51
Tabla 8. Eficiencia promedio por tipo de vehículo.....	51
Tabla 9. Composición de la flota vehicular a gasolina. Millones de unidades. ....	55
Tabla 10. Cantidad de unidades en rubros de diésel y eléctrico. Millones de unidades. ....	56
Tabla 11. Proyección de consumo energético del parque vehicular de transporte de pasajeros. Miles de millones de Giga Joules. ....	58
Tabla 12. Total de emisiones de CO <sub>2</sub> por subsector de transporte de pasajeros y carga. millones de toneladas. ....	60
Tabla 13 Resultados y comparativo del parque vehicular proyectado contra datos estadísticos de INEGI.....	62
Tabla 14. Comparativo de resultados del ENCC y escenario BAU.....	63
Tabla 15. Resultados de los escenarios de reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> . ....	65
Tabla 16. Resultados porcentuales del comparativo de los escenarios de reducción de emisiones con respecto al escenario BAU. ....	65

## Lista De Figuras

Figura 1. Producción de energía primaria por fuente a nivel mundial, año 2018. Elaboración propia con datos de la AIE (AIEa, 2020). .....	1
Figura 2. Consumo Final Total Por Sector, año 2015. Elaboración propia con datos de la AIE (AIEb, 2020).....	2
Figura 3. Consumo y producción de energía en México al 2018. Elaboración propia con datos de SENER (2018).....	4
Figura 4. Producción De Energía Por Fuente, México 2019. Balance Nacional De Energía 2018 (SENERb, 2019). .....	5
Figura 5. Distribución de consumo final de energía por sector, México 2018. Elaboración propia con base Balance Nacional De Energía 2018 (SENERc, 2018). .....	5
Figura 6. Consumo de energía en el sector transporte. Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética 2018 (SENER-SIEa, 2020).....	6
Figura 7. Estructura porcentual del consumo energético por tipo de combustible. Balance nacional de energía 2019 (SENERe,2018). .....	8
Figura 8. Propuesta de desagregación por modos y submodos del autotransporte. Fuente: Solís y Sheinbaum (2016).....	9
Figura 9. Composición del parque vehicular en México, 2016. Elaboración propia con datos del INEGI (INEGIa, 2020). .....	9
Figura 10. Clasificación de vehículos por particular, oficial, público. Elaboración propia con datos del INEGI (INEGIb,2020). .....	11
Figura 11. Clasificación propuesta para los tipos de combustibles.....	29
Figura 12. Tipos De Clasificaciones De Modelos De Pronóstico De Demanda. Elaboración propia.....	31
Figura 13. Comportamiento Histórico Del Sector Transporte En México (2010-2017). Elaboración propia con datos de SENER (SENER-SIEb, 2020).....	35
Figura 14. Comportamiento de crecimiento del parque vehicular (2010-2017). Elaboración propia con datos de SENER ((SENER-SIEc, 2020). .....	36
Figura 15. Ventas anuales totales de automóviles (2014-2017). Elaboración propia con datos del INEGI (INEGIc, 2020). .....	36
Figura 16. Ventas anuales de camiones de carga. Elaboración propia con datos del INEGI (INEGI d, 2020).....	37

Figura 17. Venta histórica de camiones de pasajeros. Elaboración propia con datos del INEGI (INEGI, 2020).	37
Figura 18. Crecimiento poblacional en México (2010-2018). Elaboración propia con datos del Banco Mundial. (BMa,2020).	40
Figura 19. Crecimiento Del PIB Per Cápita (% anual) En México. Elaboración Propia Con Datos Del Banco Mundial (BMb, 2020).	41
Figura 20. Crecimiento poblacional y PIB en México (2010-2017). Elaboración propia con datos: Banco Mundial (BMc, 2020).	41
Figura 21. Clasificación del parque vehicular para su análisis. Elaboración propia.	48
Figura 22. Estructura general del sistema modelado. Elaboración propia.	49
Figura 23. Esquema del Escenario BAU.	50
Figura 24. Proyección de variación del parque vehicular en México al año 2050.	53
Figura 25. Composición del sector vehicular de pasajeros al año 2030.	54
Figura 26. Composición del sector vehicular de pasajeros para el año 2050.	55
Figura 27. Variación en el parque vehicular de transporte de carga.	57
Figura 28. Proyección del consumo energético del sector autotransporte.	57
Figura 29. Proyección de consumo energético del subsector transporte de pasajeros.	58
Figura 30. Variaciones del consumo energético del subsector transporte de carga.	59
Figura 31. Resultados de las proyecciones de emisiones de CO <sub>2</sub> del parque vehicular de autotransporte en México.	60
Figura 32. Porcentaje de participación por tipo de vehículo en las emisiones de CO <sub>2</sub> al 2030.	61
Figura 33. Porcentaje de Participación por tipo de vehículo en las emisiones de CO <sub>2</sub> al 2050.	61
Figura 34. Variación en las emisiones de CO <sub>2</sub> del subsector transporte de carga.	62

Figura 35. Emisiones de CO<sub>2</sub> proyectadas por el modelo de la Estrategia Nacional De Cambio Climático. ....63

Figura 36. Comparativo de los objetivos de reducción para el año 2050 contra los resultados estimados por el modelo del sector transporte. ..64

Figura 37. Resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> de los escenarios con respecto a la línea base de emisiones del año 2000. ....65

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

En el año 2018 a nivel mundial se produjo un total de energía correspondiente a 576,097 PJ, según datos de la Agencia Internacional de Energía (AIE) (2018). Dicha cantidad tiene diferentes fuentes: combustión de hidrocarburos, biocombustibles, energías renovables, entre otras. Sin embargo, el mayor contribuyente de producción energética en el año 2018 fue la producción por combustión de petróleo con un 31%, seguida de la incineración de carbón con un 27%. La Figura 1 muestra la distribución de aportación energética del resto de las fuentes energéticas.

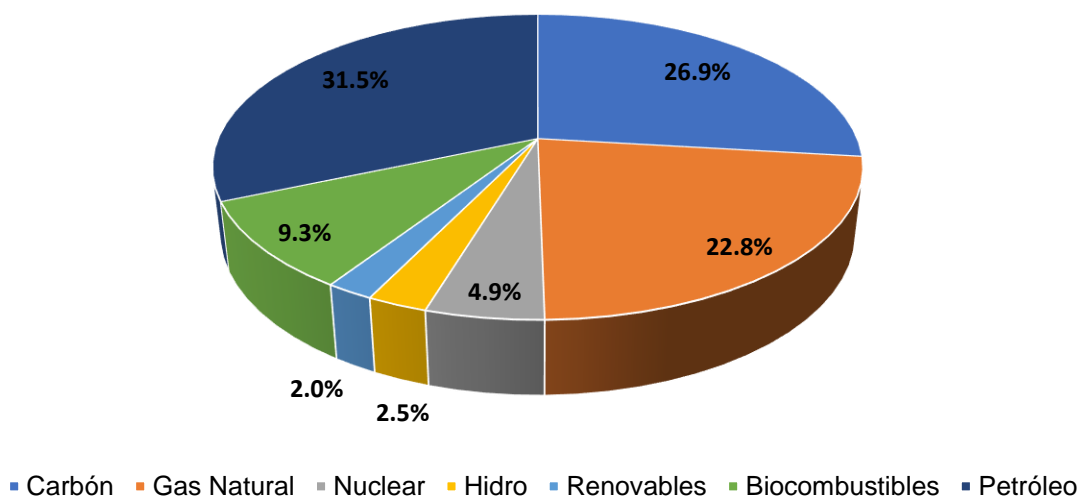


Figura 1. Producción de energía primaria por fuente a nivel mundial, año 2018. Elaboración propia con datos de la AIE (AIEa, 2020).

Con respecto al consumo final por sector a nivel mundial, los datos de la AIE muestran que en total se consumieron 371,359 PJ en todo el año 2018. En la Figura 2 se puede apreciar que el sector transporte fue el mayor consumidor de energía con un 33% del consumo total, siendo el segundo mayor el sector industrial, con un 32% de consumo.

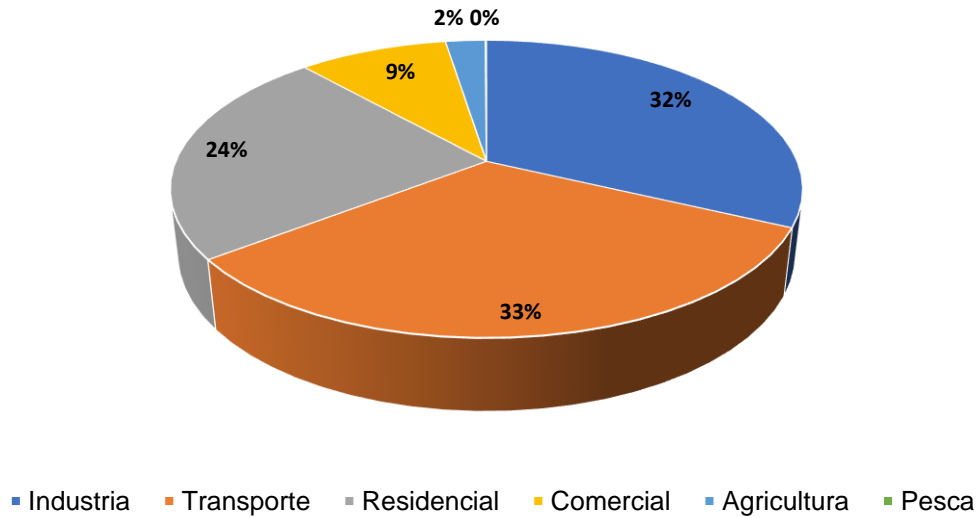


Figura 2. Consumo Final Total Por Sector, año 2015. Elaboración propia con datos de la AIE (AIEb, 2020).

## 1.2. Planteamiento del problema

Ayala J. (2009) describe que uno de los procesos que representa una de las amenazas más importantes para el desarrollo económico y social y, por lo tanto, el peligro más serio e inmediato para un desarrollo sustentable, es el aumento de la temperatura en alrededor de 2 grados centígrados respecto a la existente en los últimos 160 mil años.

En México, existe un número limitado de modelos energéticos específicos del sector transporte. Los reportes presentados por diversas dependencias gubernamentales del sector energético y del sector transporte mexicano muestran tendencias y predicciones de consumos de combustibles y de energía, sin embargo, no hay publicación alguna que muestre un modelo de crecimiento del parque vehicular a futuro.

Martínez Salgado (2018) indica que, en 2016, el sector del transporte originó el 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero en América Latina y el Caribe. El transporte por carreteras, a su vez, generó más del 80% de estas emisiones, con una distribución similar entre el transporte de pasajeros y el de carga.

Lo anterior puede ser interpretado como una problemática para alcanzar los límites de emisiones establecidos en el Acuerdo de París contra el Cambio climático.

Olabe, *et al.*, 2018, esquematizaron los puntos clave del acuerdo de París en el documento titulado El Acuerdo de París y el fin de la era del carbón, refiriendo que se debe evitar un incremento en la temperatura global de entre 1.5°C y 2°C. Estudios realizados por el IPCC (2014), reportaron que las emisiones totales para el año 2050 deberían situarse en una horquilla de entre 15 y 20 Gigatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GtCO<sub>2</sub> eq.) (Change, 2014).

### 1.3. Hipótesis

Mediante el empleo de un modelo energético del sector transporte en México se podrá realizar un análisis de la sustentabilidad con base en indicadores ambientales, energéticos y datos históricos del sector transporte en el país.

### 1.4. Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un modelo energético del sector transporte en México para evaluar escenarios de desarrollo sustentable al 2050.

#### 1.4.2. Objetivos específicos

- Análisis y selección de plataformas para el desarrollo de un modelo energético del sector transporte en México.
- Diseño e implementación del modelo energético.
- Validación del modelo energético.
- Planteamiento y análisis de escenarios de desarrollo del sector transporte en México con base en indicadores, ambientales, energéticos y políticas públicas.
- Evaluación y análisis de la sostenibilidad energética del sector transporte en México al año 2050.
- Generación de recomendaciones para el sector transporte al año 2050.



## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1. Sector energético en México

Los datos publicados en el Balance Nacional de Energía (SENER, 2018) indican que, en el transcurso del 2018, el consumo de energía en México superó 29.8% a la producción de energía primaria, quedando así un consumo total de 9,236.86 PJ. La producción nacional fue de 7,027.22 PJ. En el mismo año se presentó una contracción del 7.7% en la producción de energía respecto al año 2017. Las variaciones de consumo y producción pueden ser apreciadas en la Figura 3.

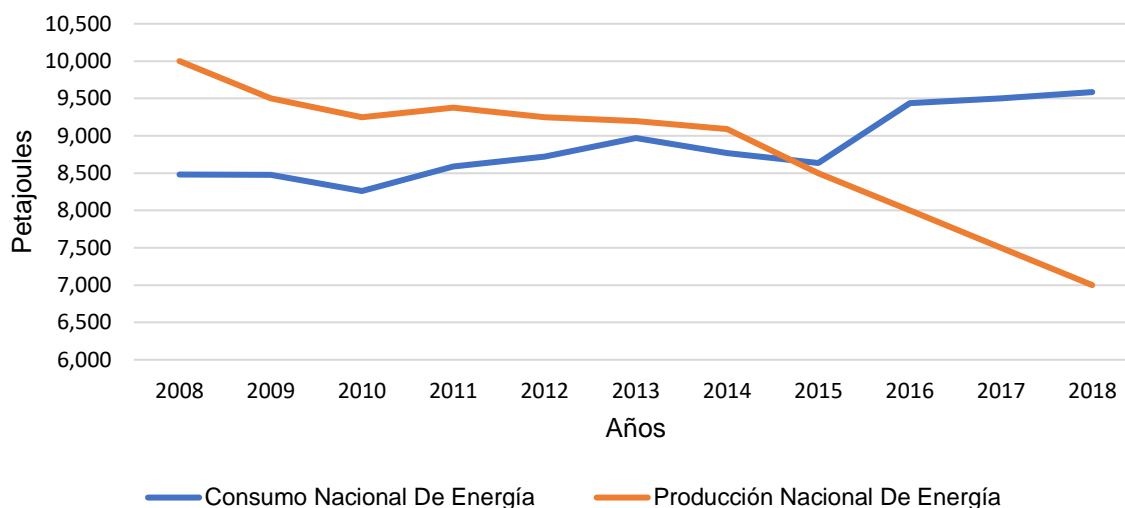


Figura 3. Consumo y producción de energía en México al 2018. Elaboración propia con datos de SENER (2018).

En el año 2018, la energía total producida en México fue generada en un 62.4% a partir de la combustión de petróleo. El gas natural aportó un 19.7% de generación, por su parte, las energías renovables aportaron en conjunto el 10.4% (Figura 4).

El sector de mayor consumo en el año 2018 fue el del transporte, con un consumo de 2,454.69 PJ, representando un total de 48.18% de la demanda. El resto de los sectores puede ser apreciado en la Figura 5.

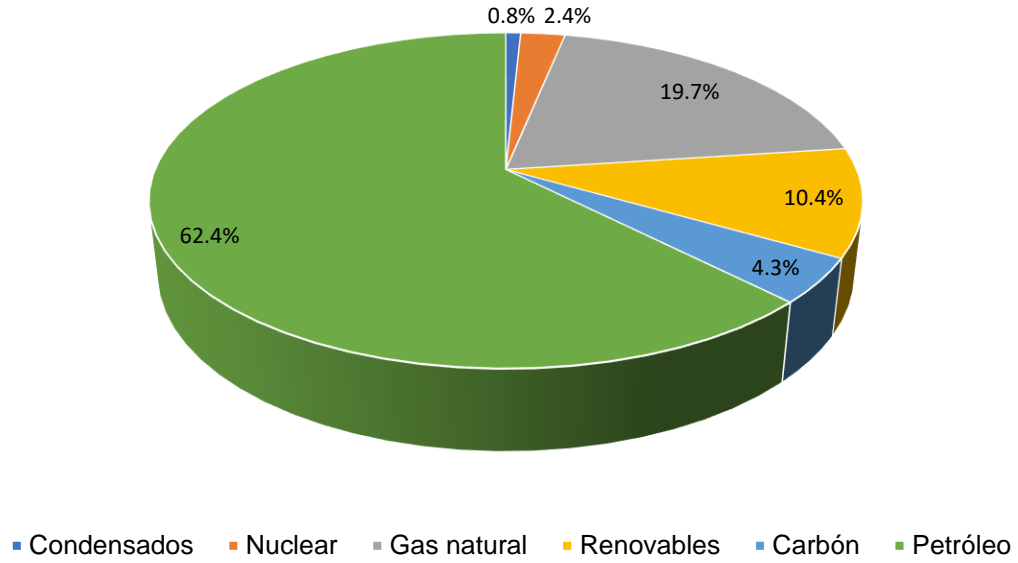


Figura 4. Producción De Energía Por Fuente, México 2019. Balance Nacional De Energía 2018 (SENERb, 2019).

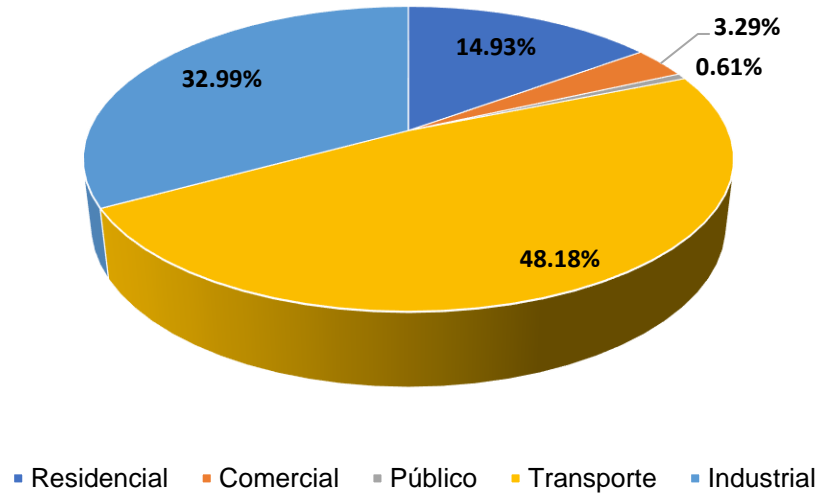


Figura 5. Distribución de consumo final de energía por sector, México 2018. Elaboración propia con base Balance Nacional De Energía 2018 (SENERc, 2018).

### 2.1.1. Sector transporte en México

El consumo de combustibles en el sector transporte totalizó 2,454.70 PJ en el 2018, 4% mayor que el 2017. El subsector con mayor demanda fue el autotransporte, con 2,205.06 PJ de demanda, representando el 89.8%. Los demás rubros aparecen en la Figura 6.

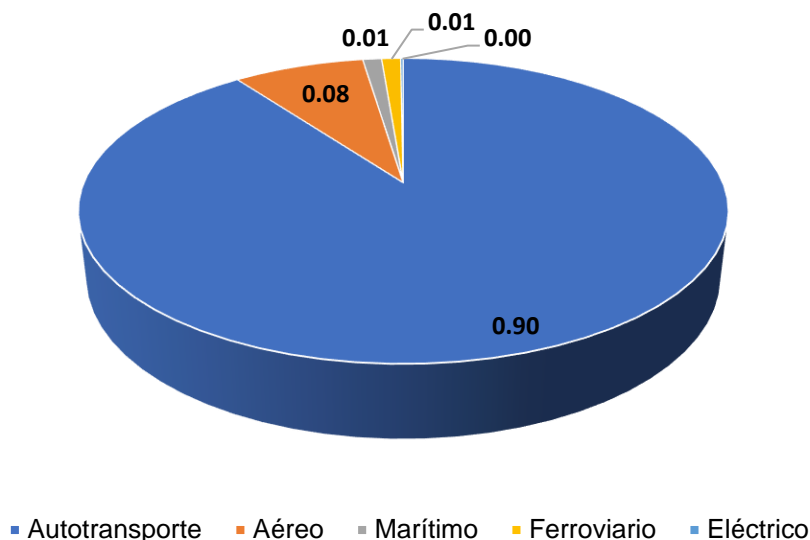


Figura 6. Consumo de energía en el sector transporte. Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética 2018 (SENER-SIEa, 2020).

El rubro de aéreo presentó un incremento del 10% con respecto al año anterior. El subsector de autotransporte también sufrió un incremento del 3.7% en el año 2018. El resto de los componentes y sus variaciones pueden ser observados en la Tabla 1.

El combustible más utilizado por el sector de autotransporte fue la gasolina, con un 72.8% de aportación, el diésel ocupa el segundo lugar con 24.2%. Para el sector aéreo, la fuente de energía más recurrente fue el queroseno, representando 99.5% del total consumido. La Figura 7 muestra la distribución de consumo de combustibles derivados de hidrocarburos de los diferentes rubros del sector transporte.

Tabla 1. Consumo de energía en el sector transporte. Balance nacional de energía 2019 (SENERd,2018).

	2017	2018	Variación porcentual (%)	Estructura porcentual 2018
<b>Transporte</b>	2,360.16	2,454.70	4.01	100.00
<b>Autotransporte</b>	2,124.59	2,205.07	3.79	89.83
Total de petrolíferos	2,122.38	2,202.34	3.77	99.88
Gas licuado	62.41	63.07	1.07	2.86
Gasolinas y naftas	1,502.39	1,606.06	6.90	72.84
Diésel	557.58	533.20	-4.37	24.18
Gas seco	2.21	2.73	23.38	0.12
<b>Aéreo</b>	173.39	190.74	10.01	7.77
Total de petrolíferos	173.39	190.74	10.01	100.00
Gasolinas y naftas	0.85	0.96	12.90	1.00
Querosenos	172.53	189.77	9.99	99.00
<b>Marítimo</b>	29.13	27.46	-5.74	1.12
Total de petrolíferos	29.13	27.46	-5.74	100.00
Diésel	28.16	24.56	-12.78	89.00
Combustóleo	0.97	2.90	198.05	11.00
<b>Ferrovionario</b>	29.25	27.76	-5.10	1.13
Total de petrolíferos	29.17	27.57	-5.50	99.31
Diésel	29.17	27.57	-5.50	99.31
Electricidad	0.08	0.19	135.92	0.69
<b>Eléctrico</b>	3.80	3.67	-3.27	0.15
Electricidad	3.80	3.67	-3.27	100.00

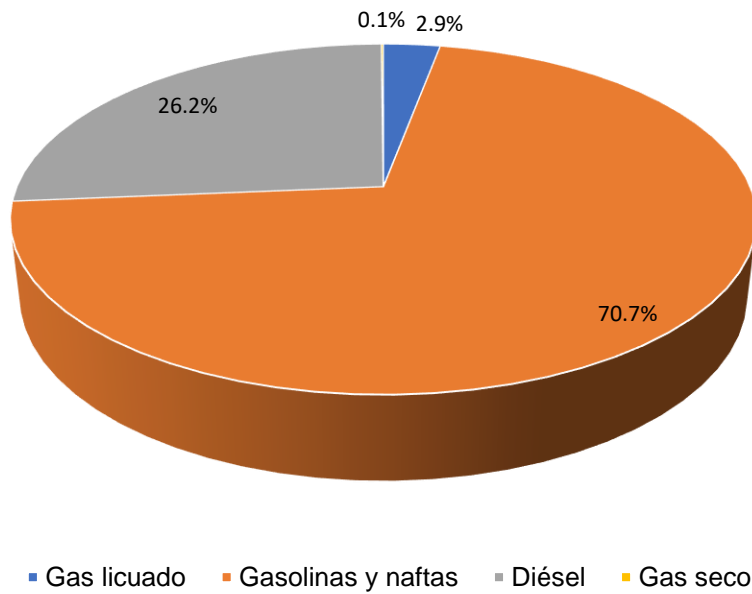


Figura 7. Estructura porcentual del consumo energético por tipo de combustible. Balance nacional de energía 2019 (SENERe,2018).

### 2.1.2. Parque vehicular

Con relación a la composición del sector transporte, Solís y Sheinbaum (2016) muestran una propuesta de clasificación en cuanto a función y tipo de vehículo. La clasificación, representada en la Figura 8, se divide en tres secciones, cada una con sus subsecciones de acuerdo con la función realizada. También se hace una separación por tipo de combustible que el vehículo emplea.

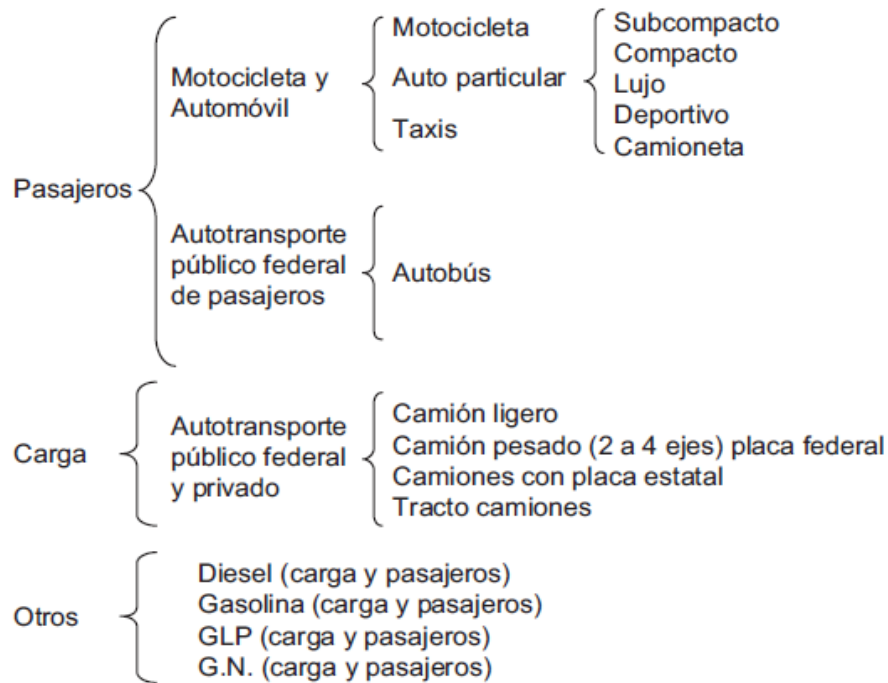


Figura 8. Propuesta de desagregación por modos y submodos del autotransporte. Fuente: Solís y Sheinbaum (2016).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), presenta una clasificación diferente del parque vehicular. En el año 2016 se registraron un total de 34.54 millones de vehículos, de los cuales el 35.9% está conformado por vehículos tipo camioneta y un 21% de vehículos tipo compacto. La Figura 9 representa la distribución de vehículos por categoría.

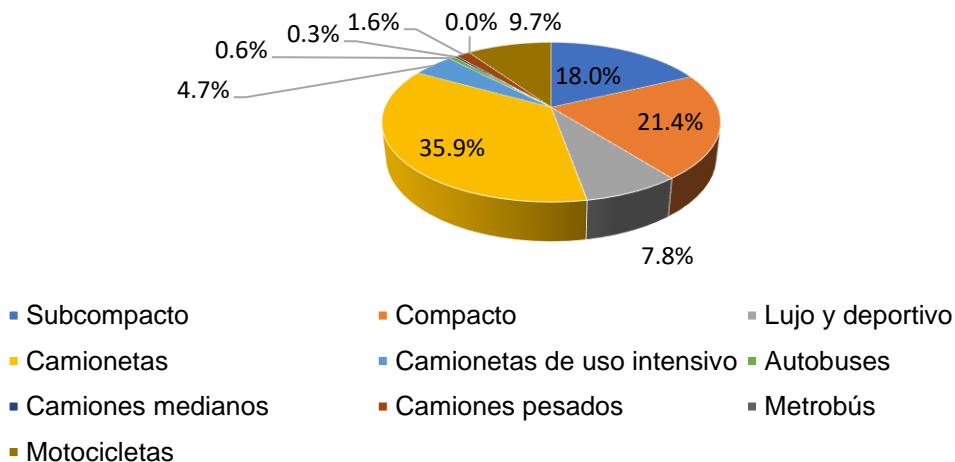


Figura 9. Composición del parque vehicular en México, 2016. Elaboración propia con datos del INEGI (INEGI, 2020).

El INEGI (2017) ofrece una definición para la clasificación de vehículos oficiales, particulares y públicos:

- Oficial: transporte de pasajeros y/o carga que se utiliza por los organismos gubernamentales para satisfacer sus propios requerimientos y/o atender las necesidades de la población.
- Particular autotransporte por cuenta propia que proporcionan las personas físicas o morales con unidades de su propiedad.

La categoría pública se subdivide en:

- Estatal: Transporte que proporcionan las personas físicas y morales al público en general, para el transporte de pasajeros y bienes utilizando caminos y puentes de índole local. Las concesiones para este tipo de servicio las brindan los gobiernos locales.
- Federal: Lo presentan las personas físicas y morales para trasladar pasajeros y bienes, utilizando los caminos y puentes federales. La concesión para esta movilidad la otorga la Secretaría De Comunicaciones y Transportes (SCT).

Una vez clasificado el sector transporte por tipo de vehículo, se revisan las emisiones que se generan por causa del empleo de los diferentes medios de transportes.

La Figura 10 muestra la distribución porcentual, según la clasificación de vehículos oficiales, público o particular. El 65.9% es particular, 23.9% son de carga de mercancía particular.

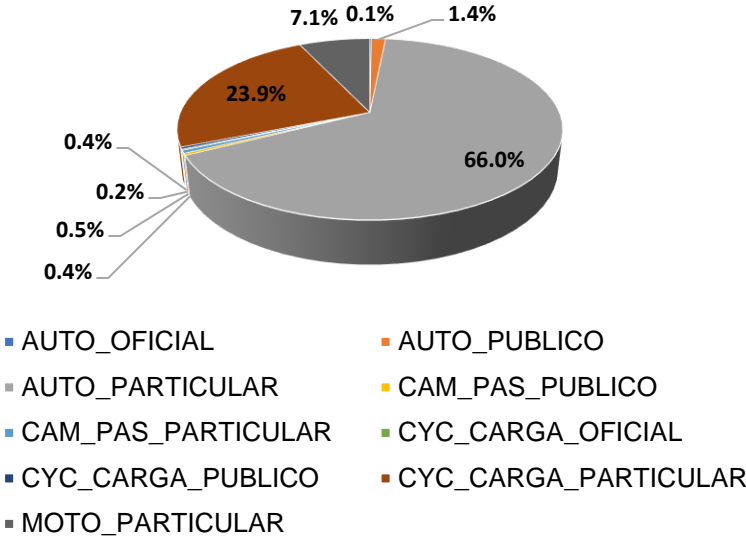


Figura 10. Clasificación de vehículos por particular, oficial, público. Elaboración propia con datos del INEGI (INEGIb,2020).

2.1.3. Indicadores socioeconómicos y ambientales

Van der Hoeven (2015) define a los indicadores energéticos como parámetros que sirven para analizar interacciones entre la actividad económica y humana, el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estos indicadores permiten identificar dónde se pueden efectuar ahorros de energía, tanto en una empresa como a nivel agregado.

Pinzón *et al.* (2014) ofrecen una descripción que los indicadores deben de cumplir para ser considerado en cualquier tipo de análisis;

- Deben de permitir establecer el nivel de una condición o un problema como punto de partida para la toma de decisiones.
- Ser relevante.
- Ser entendible.
- Estar basado en información confiable.
- Ser transparente y verificable.



- Estar basado en información específica con relación al proceso/sistema y el tiempo.
- Poder medir cambios en una condición o situación a través del tiempo.
- Facilitar observar de cerca los resultados de iniciativas o acciones.
- Ser instrumentos valiosos para determinar cómo se pueden alcanzar mejores resultados en proyectos de desarrollo.

El consumo energético del sector transporte está influenciado por una gran variedad de factores, los cuales se agrupan según los segmentos de pasajeros y mercancías. Las tendencias respecto a la energía, así como la eficiencia para ambos rubros se calculan por separado.

La tendencia del consumo de energía del sector transporte a nivel mundial ha ido al alza desde 1990, donde el consumo registrado para ese año fue de 65,954.1 PJ y 2018 fue de 121,036.2 PJ (IEAc, 2020). Lo anterior representa un incremento en la demanda de energía de ese sector en más del 69%.

Para el sector transporte, el análisis de eficiencia energética se dirige a la medición de la eficiencia de vehículos o de modos de transporte específicos. Horta Nogueira (2010) describe al consumo de energía por pasajero-kilometro o tonelada-kilometro como “indicadores de intensidad”.

Van der Hoeven (2015) explica que, las tendencias de energía en el transporte de pasajeros están dadas por los cambios en la población y su densidad, extensión del uso de la tierra, infraestructura de transporte, hábitos de viaje, nivel de ingresos, tasa de equipamiento, ocupación de vehículos, preferencias de los consumidores, y el consumo medio de combustible.

De modo general, a efectos de desarrollar indicadores de eficiencia energética en el transporte de pasajeros, para el presente trabajo, las principales variables de actividades consideradas para explicar las tendencias del consumo energético son los pasajero-kilómetro y los vehículo-kilómetros.

Horta Nogueira (2010), propone utilizar como indicador el consumo de energía total de sector por unidad de producto interno bruto (PIB), ya que la demanda de transporte correlaciona en alta medida con el PIB.

#### 2.1.4. Políticas energéticas y medioambientales en el sector transporte

El estado mexicano, a lo largo de su historia ha sido partícipe en la firma de diversos acuerdos en materia de cambio climático y medio ambiente internacional. Algunos de los tratados internacionales firmados por México son:

- La Declaración de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano, signada en Estocolmo, Suecia en junio de 1972, proclamó que los conocimientos y las acciones del hombre se utilizarán para conseguir mejores condiciones de vida, pero estableciendo normas y medidas que evitarán que se causarán daños al medio ambiente. La declaración establece 26 principios que tienen por objeto la utilización racional de los recursos naturales en beneficio de las generaciones presentes y futuras (Jankilevich, 2012).
- La Declaración de Río celebrada en 1992 que consagra 27 principios, en los que establece el derecho a una vida saludable, productiva en armonía con la naturaleza, el derecho de los países de aprovechar sus propios recursos de acuerdo con sus políticas ambientales, también el derecho al desarrollo con la responsabilidad de no causar daños al medio ambiente de otros, la protección del medio ambiente como parte integrante del proceso de desarrollo. Además, se reconoce el papel que los países desarrollados han tenido al contribuir en la degradación del medio ambiente, por lo que se conmina a eliminar las modalidades de producción y de consumo insostenibles y a fomentar políticas demográficas adecuadas (Avendaño, 2011).
- Otro de los documentos suscritos en la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, Brasil en el año 1992, fue la Agenda 21 la cual es un manual de referencia de normas y políticas para el logro de un desarrollo sustentable. La agenda menciona que la población, el consumo y la tecnología son las

principales determinantes del cambio ecológico, por lo que conmina a reducir las modalidades de consumo ineficaces y con desperdicio. Propone políticas y programas para lograr un equilibrio entre consumo, la población y la capacidad de sustento de la Tierra (Lafferty, *et al.*, 2013).

- El Acuerdo de París celebrado en Francia en el año 2015, compromete a las naciones, tanto desarrolladas como en vía de desarrollo, a trabajar unidas, de manera ambiciosa, progresiva, equitativa y transparente, para limitar el incremento de la temperatura global por debajo de 1.5 °C para evitar una catástrofe climática mundial (Olabe *et al.*, 2016).
- La agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. El acuerdo plantea 17 Objetivos con 169 metas de carácter integrado e indivisible que abarcan las esferas económica, social y ambiental (Objetivos de Desarrollo Sostenible, s.f.).

En materia nacional, México a través de la Secretaría de Energía emite anualmente el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN). El instrumento contiene la planeación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), concerniente a las actividades de generación, transmisión y distribución de energía en territorio nacional.

El PRODESEN, está basado en diferentes programas nacionales enfocados en el sector eléctrico. Uno de ellos es el Programa Indicativo Para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE), en donde se establece de forma indicativa los requerimientos de capacidad de generación para satisfacer la demanda de energía eléctrica y cumplir con las metas de energías limpias.

Algunos de los puntos abordados por el PRODESEN son;

- Soberanía, seguridad energética nacional y sostenibilidad.
- Planeación del SEN.
- Vigilar el ámbito de generación de energías limpias, así como también renovables cumpliendo con los compromisos internacionales en relación con el cambio climático y reducción de emisiones.

Dentro de los aspectos que conciernen al rubro del sector transporte se encuentra que se debe impulsar el desarrollo de la movilidad eléctrica de transporte público y privado, que sea capaz de incorporar paulatinamente a las energías renovables como energía primaria (Secretaría de Energía, 2020).

Otros programas gubernamentales enfocados a políticas de movilidad se encuentran en los siguientes documentos;

- Plan Nacional de Desarrollo, específicamente en la sección estratégica de México Incluyente.
- Programa Sectorial de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, publicado en el Diario Oficial De La Federación el 16 de diciembre del año 2013.
- Estrategia Nacional De Movilidad Urbana Sustentable, publicada en el año 2014, por la Subsecretaria de Desarrollo Urbano Y Vivienda de la Secretaría De Desarrollo Agrario Territorial Y Urbano (SEDATU).

Adicional a los planes de acción previamente mencionados se encuentra el Programa "Transporte Limpio", en donde de manera voluntaria se busca que el transporte de carga y pasaje que circula por el país sea más eficiente, seguro, competitivo, así como también amigable con el medio ambiente.

Los objetivos de dicho programa son:

- Reduzcan sus consumos de combustible.
- Disminuyan las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero y contaminantes criterio (óxidos de nitrógeno y partículas).
- Reduzcan la huella de carbono.

En el Foro de Movilidad Urbana Sustentable en México (2020), la Cámara de Senadores reconoce que para el año 2030 se debe reducir 162 Mt/año de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), lo cual implica la aplicación de políticas sólidas de reducción de km-vehículo recorridos, eficiencia de motores y gasolinas, logística y cambio modal de carga, ciudades compactas y políticas integradas de transporte público y no motorizado.

Concretamente en el documento titulado Compromisos De Mitigación Y Adaptación Ante El Cambio Climático Para El Periodo 2020-2030 el estado mexicano (Gobierno de la República, 2015) plantea reducir un 30% de emisiones respecto a la línea base en el 2020 y 50% en 2050 en relación con las emisiones del año 2000.

## 2.2. Tipos de combustibles en el sector transporte

A continuación, se analizan diferentes opciones de combustibles para los vehículos, lo anterior alineado al compromiso que adquiere México de reducir las emisiones de GEI provenientes del sector transporte en un 21% sobre la línea base, al reducir de 229 Mt CO<sub>2</sub>eq a 181 Mt CO<sub>2</sub>eq al año 2030 este compromiso se adquiere ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Sandoval, 2019).

### 2.2.1. Gasolina

Las gasolinas son una mezcla de hidrocarburos derivadas de diversas corrientes de transformaciones fisicoquímicas obtenidas de la refinación del petróleo. Para que la gasolina pueda ser empleada por los usuarios finales, antes precisa ser sometida a diferentes transformaciones, hasta llegar a su etapa final en la estación de servicio.

Las gasolinas comercializadas en las estaciones de servicio son una mezcla de hidrocarburos integrada por moléculas de entre 4 a 12 átomos de carbono (C4 a C12). La composición aproximada queda con un 15% de parafinas, 25 a 40% de iso parafinas, 10% naftenos, 25% aromáticos, 10% olefinas (Castillo, 2012).

Ivanchina *et al.*, (2020) indican que la gasolina se caracteriza por proporcionar al motor del vehículo un arranque fácil en frío, una potencia máxima durante la aceleración, la no dilución del aceite y un funcionamiento normal y silencioso bajo las condiciones de funcionamiento del motor, ésto es debido a sus buenas propiedades de octanaje y volatilidad. En los motores de combustión interna de encendido provocado se quema gasolina (hidrocarburos) para así obtener la energía necesaria; como consecuencia de dicho proceso, a través del tubo de escape de los vehículos, se expulsan a la atmósfera sustancias que contribuyen a su contaminación. Las sustancias son entre otras:

- Hidrocarburos sin quemar.

- Óxidos de nitrógeno.
- Monóxidos de carbón.
- Aditivos del combustible.

En lo concerniente a los aspectos ambientales, las características fisicoquímicas de las gasolinas juegan un papel importante por su impacto en los sistemas de control de emisiones. La proporción de azufre, componentes aromáticos, bencenos, olefinas, oxígeno y plomo presentes en la mezcla de gasolina juegan un papel importante para la emisión de contaminantes al ambiente. Una medida más que ha sido adoptada por los fabricantes de automóviles es incorporar en los vehículos un dispositivo llamado conversor catalítico o catalizador, el cual facilita la transformación de las sustancias contaminantes en otras con menor grado de contaminación, llegando a reducirse hasta un 85% de las emisiones de los gases contaminantes (Li *et al.*, 2019).

Mead (2017) presenta en el informe de Perspectiva Energética Anual la estimación a nivel mundial para el año 2040 con respecto al consumo de energía, en donde el sector transporte represente el 55% del consumo total de combustibles líquidos, no obstante, su participación disminuirá de un 95% a aproximadamente un 88% a medida que el uso de combustibles alternativos aumente gradualmente. La gasolina para motores, incluidos los aditivos para biocombustibles, seguirá siendo el principal combustible para el transporte en el año 2040, representado el 36% del uso de energía relacionada con el transporte a nivel mundial.

En el informe Prospectiva del Crudo y Petrolíferos 2018-2032, describe que, en México, se estima que en los próximos 12 años la demanda de combustibles en el sector transporte presente un incremento del 34%. En el año 2032, la gasolina y el diésel serán los combustibles de mayor demanda al representar el 90% del total. El consumo de combustibles se distribuye en un 56% de gasolinas y 35% de diésel; el resto se fracciona entre 8% turbosina y 2% Gas LP. El gas natural comprimido (GNC) una pequeña participación.

### 2.2.2 Combustibles alternativos

El transporte de pasajeros y mercancía desempeña un papel esencial en las sociedades contemporáneas debido a la activación económica que conlleva. Sin embargo, a pesar de los favorables impactos económicos también trae consigo resultados tales como la contaminación causada por el tráfico vehicular. En muchas ciudades alrededor del mundo el sector transporte causa hasta el 70% de las emisiones totales de carbono (Mutizwa-Mangiza *et al.*, 2013). El concepto de tecnologías de transporte alternativas y recursos energéticos alternativos ha surgido como una potencial solución a largo plazo para lograr un futuro armónico con el medio ambiente, dicho concepto se ha convertido en "un objetivo adoptado" en muchos países del mundo (Bockarjova & Steg, 2014).

En la actualidad, los principales combustibles utilizados por el sector transporte son aquellos que provienen de fuentes fósiles, la gasolina y el diésel han dominado históricamente la oferta para suplir la demanda energética del sector. Sin embargo, los graves daños ambientales provocados por el uso intensivo de fuentes energéticas contaminantes han provocado la necesidad de desarrollar nuevas fuentes alternativas, así como también menos contaminantes para suplir la demanda de fuentes energéticas. Las reservas limitadas de petróleo junto con los efectos sociopolíticos y económicos asociados son actualmente las fuerzas clave detrás de la necesidad de desarrollar fuentes de energía alternativas para reducir la dependencia del petróleo como principal fuente energética.

A continuación, se presenta una recopilación de los combustibles utilizados en el sector transporte, tanto los de origen fósil como también las fuentes energéticas no convencionales.

#### 2.2.2.1 Biocombustibles

Un combustible alternativo a los fósiles es la biomasa, conocido comúnmente como biocombustible. En el artículo titulado Impacto Social y Económico en el uso de biocombustibles, Serna (2011) relata que los biocombustibles surgen de la necesidad de frenar el alza de los precios de los combustibles fósiles y como un sustituto para las fuentes energéticas convencionales.

Fischer (2009) relata que los mercados actuales de biocombustibles nacieron en respuesta a la crisis del petróleo en la década de 1970. Diversos países respondieron con propuestas de políticas de combustibles alternativos para tratar de combatir el alza en los precios. Los dos países que crearon un mercado de biocombustibles basados en etanol y un sector de producción de biocombustibles en esa época fueron Brasil y Estados Unidos, el primero con caña de azúcar y el segundo con maíz. Desde 2005, Estados Unidos de Norte América es el mayor productor de etanol de maíz, mientras que Brasil, es el segundo mayor productor de biodiésel del mundo (Tsang et al., 2015). En México, las industrias de biocombustibles para el transporte se encuentran en una etapa inicial.

Aplicando las técnicas agrícolas y las estrategias de procesamiento apropiadas, los biocombustibles pueden resultar ser eficientes para la reducción de CO y CO<sub>2</sub> al menos en un 50%, comparando con combustibles fósiles como el diésel o la gasolina, generando repercusiones favorables para el medio ambiente.

Maciel (2016), plantea a los biocombustibles como fuentes energéticas derivadas de productos de origen orgánico previamente procesados por seres vivos. Pueden ser encontrados en formato líquido, gaseoso u sólido, su fin último es fungir como fuente energética mediante un proceso de combustión. Los biocombustibles se mezclan con combustibles convencionales en motores existentes, una de sus características principales es que su contenido energético es sutilmente menor que los combustibles fósiles. Ganduglia (2009), relata que el impacto del biodiésel sobre los contaminantes regulados óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), etc.) no es sencillo de cuantificar, puesto que múltiples factores tienen que ser ponderados. La relación de la mezcla, las propiedades físicas del biodiésel, la tecnología del vehículo, el tipo de motor y las condiciones de conducción son algunos de los criterios a tomar en cuenta para realizar las cuantificaciones de contaminación.

Debido a que existen diversos tipos de biocombustibles, los cuales han sido clasificados de diversas maneras dependiendo de la materia prima de donde han sido extraídos, se comenzó a utilizar una clasificación.



Primera generación:

La primera generación de biocombustibles son los llamados bioalcoholes, los cuales se generan a partir de materia orgánica. Los dos principales son el etanol y el metanol. El proceso de producción consiste en la fermentación de diversos cereales, tubérculos, celulosa y azúcares.

Para la obtención de los productos de la primera generación se emplea tecnología convencional como la fermentación, transesterificación (para los aceites y grasas), y la digestión anaerobia. De estos procesos se obtiene etanol, metanol y n-butanol, biodiésel (a partir de los aceites), y biogás, que se compone de una mezcla de metano y anhídrido carbónico, también conocidos como gas natural y dióxido de carbono, obtenida a partir de los desperdicios orgánicos.

Segunda generación:

Los insumos que emplea la segunda generación de biocombustibles son residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa (Naik, 2010). El bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallo, hojas y olote), paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, son las principales fuentes de biomasa para la elaboración de biocombustibles.

A diferencia de los biocombustibles de primera generación, los procesos de producción tienen un nivel de complejidad más alto, destaca la sacarificación, fermentación y el proceso Fischer-Tropsch (Schulz, 1999). Ese último proceso consiste en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, que después es sintetizado algún combustible líquido como el etanol. Mediante los procesos de segunda generación se fabrican etanol, metanol, gas de síntesis (mezcla de anhídrido carbonoso, mejor conocido como monóxido de carbono, e hidrógeno), biodiésel, 2.5-dimetilfurano (DMF), entre otros.

Tercera generación:

En esta generación la biomasa empleada proviene de vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les denomina “cultivos energéticos” (Maciel, 2016). Entre estos vegetales están los pastos perennes, árboles, plantas de crecimiento rápido, así como también las algas verdes y verdeazules. Los procesos de obtención de biocombustibles se encuentran en fase de desarrollo, sin embargo, se ha logrado producir biodiesel y etanol a nivel planta piloto.

Un biocombustible que también es utilizado como alternativa a combustibles convencionales es el biodiésel, el cual es un derivado de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos de diferentes oleaginosas, así como también de aceite de fritura usado y de grasa animal. Su proceso de obtención actualmente se basa en la transesterificación catalítica de esas grasas en presencia de un alcohol de cadena corta. Este proceso es utilizado para reducir la viscosidad de los triglicéridos, mejorando sus propiedades físico-químicas, optimizando, así, su uso como combustible en motores del ciclo diésel sin la necesidad de cualquier adaptación. Por ser una reacción reversible, para que sea inducida a producir el máximo del biodiesel, se utiliza alcohol en exceso (Castellar Ortega *et al.*, 2014).

Machado (2010) describe que, a partir del inicio de los años 90, el proceso de industrialización del biodiésel fue iniciado en Europa. Por tanto, el principal mercado productor y consumidor de biodiesel en gran escala es la Unión Europea, que produce anualmente más de 7 millones de toneladas de biodiésel. Eso corresponde a un 64% de la producción mundial.

El incremento en el consumo de biocombustibles a nivel mundial ha generado una creciente preocupación de los sectores agrícola y ambiental, debido a los impactos que conlleva la generación de estas fuentes energéticas y los posibles riesgos a corto plazo que pueden ocasionar para la seguridad alimentaria de algunos países.

#### *2.2.2.2 Impactos del uso de biocombustibles*

El principal riesgo económico que se ha suscitado dentro del mercado mundial es el aumento de precios en los alimentos no sólo por el actual sino por el futuro

crecimiento en la producción y demanda de biocombustibles provenientes de productos agrícolas como el maíz (González y Castañeda, 2010).

Como se ha planteado antes, los biocombustibles pueden ser obtenidos del procesamiento de biomasa proveniente de diferentes fuentes. Aunque el uso eficiente de residuos y co-productos provenientes de diferentes procesos parezca ser más viable en el corto plazo para obtener la biomasa necesaria, problemas relacionados a la logística, como recolección y transporte deberán ser resueltos y representan un gran cuello de botella para un uso más amplio. Una alternativa que funge como fuente confiable y ambientalmente amigable para la obtención de materia prima para la elaboración de combustibles son los cultivos planteados exclusivamente para ese fin. De la Rosa Ramos (2015) plantea que esa ventaja se da porque los cultivos celulósicos dedicados podrán ser mejorados para las características deseables en el proceso, contribuyendo, incluso, para su simplificación y disminución de costo. Además de eso, el mejoramiento para aumentar la tolerancia a los estreses bióticos y abióticos posibilitaría la producción de esos cultivos en áreas marginales donde la producción de alimentos es inviable. Evitando así un incremento en los costos de los cereales utilizados para consumo humano y agrícola.

Para la elección de una especie energética se debe llevar en cuenta su composición e indicadores agronómicos como la productividad, costo de producción, adaptabilidad a diferentes suelos y climas. Naturalmente, los cultivos adecuados dependen del clima local donde serían producidos (Montico, 2016).

El impacto de los biocombustibles en la agricultura también debe de ser considerado, puesto que depende no solo de los cultivos que van directamente a las fábricas de biocombustibles, sino también de las consecuencias para los mercados de productos básicos en general en términos de producción, comercio y precios.

Marelli (2015) relata los diferentes escenarios económicos ligados a la producción de biocombustibles en Europa, donde los efectos de los biocombustibles en la industria ganadera de la Unión Europea son casi nulos. Ésto se debe a que los

biocombustibles tienen subproductos que se utilizan para la alimentación animal, compensando así la parte de materia prima de biocombustible que se desvía del mercado de alimentación animal. Debido a la necesidad de mantener la producción de alimentos: el 'hueco' en el suministro de alimentos se llena en parte por la expansión de las tierras de cultivo alrededor del mundo (Bracco, 2015).

Países como Brasil y la Unión Americana cuentan con mandatos de uso de mezclas de etanol del 27% (etanol E27), y 15% (E15) respectivamente (USDA Foreign Agricultural Services, 2017). México también ha establecido regulaciones para el uso de biocombustibles como fuente energética en el sector transporte. La Norma Oficial Mexicana 016 de la Comisión Reguladora de Energía (NOM-016-CRE-2016, 2016) indica que el etanol puede ser utilizado como oxigenante en el combustible en una proporción de 10% en el volumen utilizado. Sin embargo, dicha mezcla es escasa de encontrar en el mercado de combustibles y no es una fuente energética de uso cotidiano en el sector transporte.

#### *2.2.2.3 Electricidad*

Una alternativa más para sustituir el uso intensivo de combustibles de origen fósil es utilizar vehículos eléctricos (VE). Dichos vehículos, generan una gran expectativa concerniente a la reducción de la dependencia del petróleo como fuente energética, hasta ser la principal opción para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte. Sin embargo, en la actualidad, existen diversos factores que impiden la puesta en marcha generalizada.

La electromovilidad cobra interés público a finales del siglo XX originado especialmente por el impacto de los vehículos tradicionales con motor de combustión interna sobre el medio ambiente, aunado a la inminente escasez de reservas de combustibles fósiles y por las nuevas medidas en pro de la reducción de emisiones de GEI.

Scorrano (2020) señala que los VE presentan múltiples limitaciones tecnológicas, como la autonomía eléctrica restringida y el tiempo necesario para cargar la batería, el costo de adquisición es más elevado que el de los vehículos convencionales; y requieren una infraestructura adecuada para cargar la batería. Sánchez (2019),

también considera que actualmente existen barreras que impiden su empleo masivo. Algunos ejemplos son:

1- El costo de la batería, en términos de \$/kWh, que resulta superior al 25% del valor total del vehículo y, por lo tanto, encarece el costo de éste.

2- La capacidad de almacenamiento limitada que restringe la distancia recorrida, para la gran mayoría de los vehículos como, por ejemplo, el VW egolf tiene un alcance de 300 km, el Nissan Leaf varía entre 199 km y 250 km y el Renault Kangoo ZE ofrece una autonomía de 270 km.

3- Falta de infraestructura para la carga de las baterías.

Giansoldati (2018) también describe que un vehículo eléctrico tiene una capacidad de almacenamiento entre 15 y 30 kWh, lo que le confiere una autonomía de entre 150 y 200 km. Dadas estas limitaciones, el mejor uso para los vehículos eléctricos todavía parece ser el uso diario, en distancias cortas.

El empleo de VE, en la actualidad a pesar de las limitaciones mencionadas se presenta como una opción viable para la disminución de GEI, sin embargo, al considerar el ciclo de vida en su totalidad, los posibles beneficios relacionados con la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> se encuentran ligados en gran medida a la manera en cómo se produce la energía eléctrica suministrada. El debate surge en torno a las emisiones que se generan durante el proceso de fabricación de los vehículos eléctricos y, sobre todo de las baterías. Esto está altamente relacionado con el porcentaje de energías renovables en la matriz energética de los países que producen los autos y las baterías.

Con respecto a las ventas de VE, en el año 2019 sobrepasaron los 2.1 millones a nivel mundial, superando las del año anterior, aumentando así el stock a 7.2 millones de coches eléctricos. Los VE, que representaron el 2.6% de las ventas mundiales de automóviles y aproximadamente el 1% del stock mundial en 2019, registraron un incremento interanual del 40%. La infraestructura para la carga de vehículos eléctricos continúa expandiéndose. En 2019, había cerca de 7.3 millones de cargadores internacionalmente, de los cuales cerca de 6.5 millones eran

cargadores lentos privados para vehículos ligeros en domicilios, inmuebles de casas diversas y sitios de trabajo (IEA, 2020).

La oferta de VE puede ser dividida en híbridos ligeros, los vehículos 100% eléctricos de batería y los “enchufables” o *plug-in*. Los avances más recientes en desarrollo han sido los motores eléctricos alimentados por celdas de combustible de hidrógeno (Isla, 2019).

#### 2.2.2.4 Gas licuado de petróleo

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) se compone de una mezcla de propano ( $C_3H_8$ ) y de butano ( $C_4H_{10}$ ). El GLP es un subproducto o derivado del petróleo que se almacenan y transportan en forma líquida (de ahí el nombre) aunque van siempre acompañados de una bolsa o cámara de fase gaseosa.

Cada país define la proporción de ambos gases en función del tipo de vehículo. La mezcla más común usada en México es de 80% butano, 20% propano, sin embargo, esta composición puede variar.

Desde los inicios del siglo XX se descubrió al GLP como subproducto del petróleo, donde se comenzó a utilizar inicialmente como sustituto de leña para calefacción y cocción. Sin embargo, fue hasta la década de 1940 cuando comenzó a cobrar fuerza, principalmente en Europa.

En México a principios de la década de 1960 el GLP se comenzó a utilizar para vehículos. Su uso presenta algunas ventajas con respecto al diésel o la gasolina, tales como:

- Menor contaminación por una combustión más eficiente
- Menor costo por litro
- No mancha ni deja residuos
- Su combustión no genera lluvia ácida

Históricamente, en México el GLP ha sido empleado en diversos sectores del país como fuente energética, sin embargo, el sector de mayor consumo ha sido el sector residencial, puesto que es utilizado mayoritariamente en la vida cotidiana de los

mexicanos para satisfacer las necesidades de cocción de alimentos, calefacción y calentamiento de agua (Prospectiva de Gas L.P. 2018-2019, 2020)

Con respecto a su empleo como combustible en vehículos, la utilización del GLP no genera emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) culpable junto los NO<sub>x</sub> de la lluvia ácida, elimina los olores y humos de aceleración característicos de los motores diésel, así como también reduce a niveles mínimos las vibraciones del motor.

El GLP es un combustible viable para su uso en motores de Ciclo Otto, pero éstos tienen que someterse a una serie de adaptaciones en el sistema de inyección. También se puede usar en motores diésel transformados, aunque permite utilizar catalizadores de tres vías, con lo que se consigue reducir las emisiones de CO, NO<sub>x</sub> e hidrocarburos no quemados (Segovia., 2010).

El uso del GLP a nivel de autobuses urbanos permite alcanzar, en la actualidad, niveles de emisiones mucho más reducidas que cualquier tecnología avanzada del diésel en los próximos años. El GLP tiene efectos ambientales ligeramente más positivos en comparación con los vehículos de gasolina. Sin embargo, al comparar los vehículos que funcionan con diésel, el GLP tiene peores resultados (Ngang *et al*, 2018).

Con respecto al panorama del GLP en México, la SENER informa en el documento titulado Prospectiva de Gas L.P. 2018-2019 (2020) que de acuerdo con los modelos de tendencias de consumo elaborados por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), para el año 2032 la demanda de combustible del sector autotransporte será de 1,628.6 barriles diarios de gasolina equivalente (MBDGE), la participación del GLP como combustible para el sector se proyecta en 31.9 MBDGE representando el 1.9% del total, mientras que la gasolina tendrá un consumo de 1,001.1 MBDGE siendo el 61.5% del total de la energía provista para el sector transporte. El informe también indica que el uso del GLP como combustible para vehículos tendrá un crecimiento del 6.7% hacia el 2032 comparado con el año 2017, año base de proyección.

#### 2.2.2.5 Gas natural

El gas natural (GN) es la mezcla de gases combustibles, hidrocarburos o no, que se encuentran en el subsuelo, aunque se puedan considerar como gases naturales todos aquellos que se encuentren de forma natural en la Tierra, desde los constituyentes del aire hasta las emanaciones gaseosas de los volcanes (Gürsan *et al.*, 2020). El gas natural es la mezcla de hidrocarburos gaseosos en la que predomina fundamentalmente el metano (en proporción superior al 80%), que se encuentra en la naturaleza en yacimientos subterráneos (Koç *et al.*, 2020).

Su composición varía en función de la procedencia del yacimiento. El dentro de sus características tenemos que no es ni corrosivo ni tóxico, tiene una temperatura de combustión elevada, también tiene un estrecho intervalo inflamabilidad, lo cual lo hace un combustible seguro, en comparación con otras fuentes de energía.

Gürsan (2020) describe al GN como el combustible natural más limpio, en términos de contaminación, de los combustibles de fuente fósiles. El contenido de azufre es bajo y la generación de dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>) es muy baja. Presenta emisiones de dióxido de carbono en menor medida que otros combustibles fósiles. Se considera que la producción de gas natural es mucho más ecológica que transportar y refinar el petróleo.

#### 2.2.2.6 Hidrógeno

Fàbrega Ramos (2009) relata que el hidrógeno puede ser considerado como el elemento más cuantioso del universo, teniendo una composición del 74% de la masa de toda la materia visible en estrellas y galaxias. También se caracteriza por ser un elemento de difícil obtención por no existir en la naturaleza en estado puro, pero a pesar de este hecho, es una opción prometedora como combustible alternativo.

Es el elemento químico más ligero, estando su isótopo más abundante constituido por único par protón-electrón. Se considera que el hidrógeno es capaz de reaccionar con más elementos químicos, siendo el agua el compuesto más abundante e importante del hidrógeno.



El hidrógeno puede ser obtenido de diversas fuentes, ya sea por producción nuclear, fósil o bien de tipo renovable, mediante los siguientes procesos:

- Electrólisis del agua: es un proceso que disocia la molécula del agua en sus componentes primarios y de esa manera se obtiene hidrógeno y oxígeno, requiere gran cantidad de energía.
- Gasificación de la biomasa.

Entre las características del hidrógeno, es posible mencionar que posee una velocidad de inflamación muy alta con amplios límites de inflamabilidad, lo cual es muy favorable para su uso como combustible en motores de combustión interna, turbinas de gas o motores a chorro. Además, posee una alta temperatura de ignición y baja luminosidad de llama.

El hidrógeno se caracteriza por ser un combustible limpio, ya que según se produzca la combustión emite:

- vapor de agua, al combinarse con el oxígeno utilizado en la combustión.
- óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), si la combustión se produce mediante aire, ya que éste contiene una proporción de este elemento. Por lo tanto, la formación de  $\text{NO}_x$  es el único contaminante producido. El uso del hidrógeno como combustible se justifica puesto que reduce las emisiones de HC,  $\text{CO}_2$ , óxidos de nitrógeno y azufre (Alam *et al.*, 2020).

La Figura 11 indica la clasificación propuesta de los tipos de combustibles para vehículos existentes en la actualidad.

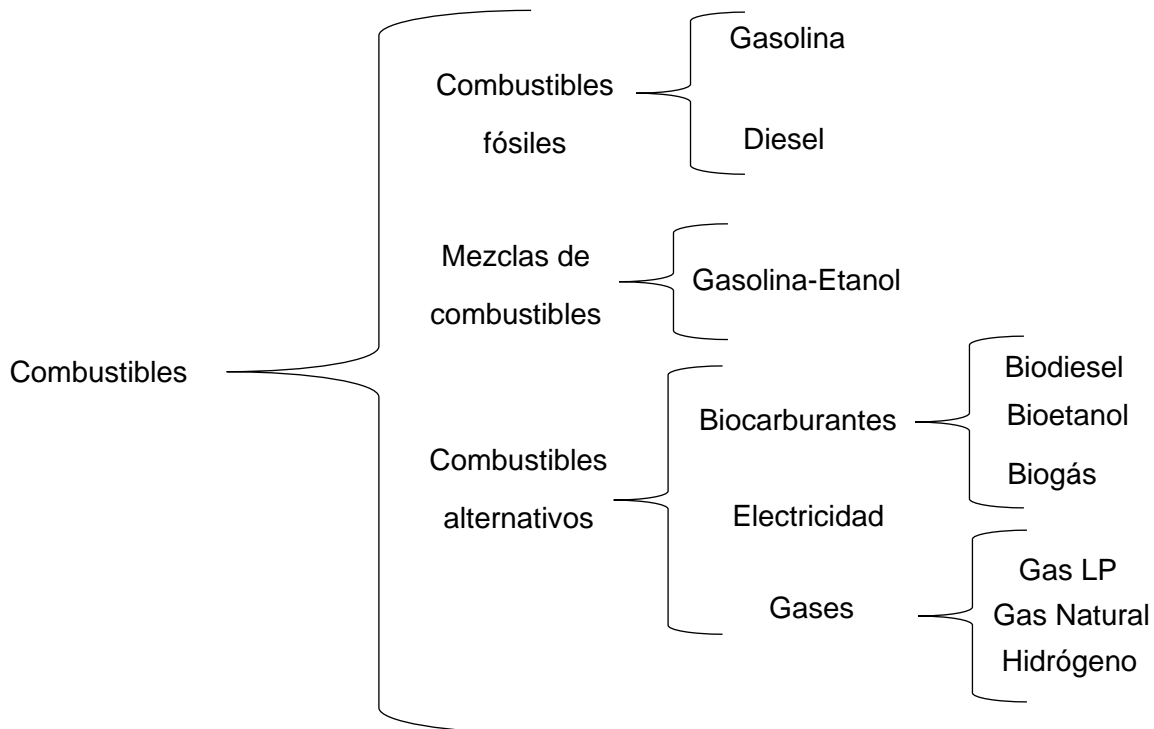


Figura 11. Clasificación propuesta para los tipos de combustibles.

### 2.3. Modelos energéticos

Para dar una definición de un modelo (en su forma más general), José Luis Rolleri se apoya en la definición que Bailes-Jones utilizan en sus investigaciones. La definición del concepto de modelo propuesto por Bailer-Jones tiene la virtud (en contraste con otros conceptos) de caracterizar los modelos no como representaciones sino como interpretaciones y de reconocer, implícitamente, el carácter idealizado y abstracto de estos (Rolleri, 2013).

La importancia de los modelos radica en que, a través de tomar en cuenta diferentes factores, organizan grandes cantidades de datos, proporcionando un marco para probar hipótesis y mostrar formas comprensibles de sistemas complejos (Heaps, 2002).

Los modelos matemáticos pueden ser empleados en diferentes áreas de las ciencias. Para Rodríguez Velázquez (2013), los propósitos generales pueden ser resumidos en tres rubros principales:

- Predecir o diagnosticar el futuro.
- Explorar el futuro (análisis de escenarios).
- Mirar hacia atrás, del futuro al presente.

En cuanto a modelos energéticos, el estudio de consumo de energía se ha transformado en un tema relevante de investigación en las recientes décadas. Los problemas relacionados tanto al consumo como a la producción de energía resultan de vital importancia por tratarse de cuestiones de seguridad nacional e internacional.

Para Suganthi y Samuel (2016) consideran basados en teorías económicas que la energía es uno de los recursos más importantes para el sector productivo y la predicción de consumo y generación de energía es una fase importante para la macro planeación tanto para el sector energético como para el sector productivo.

La planificación a largo plazo de la demanda de suministro de energía debe satisfacer los requisitos del desarrollo sostenible de los países. Los pronósticos precisos pueden ayudar a los tomadores de decisiones a conocer el volumen y la tendencia del consumo de energía a futuro, así como también para programar y desarrollar una mejor planificación de las operaciones del sistema de suministro.

El pronóstico de la carga de consumo es un tema importante de la planificación de operaciones económicas y de seguridad en los sistemas de distribución de energía. La terminología de previsión, estimación y predicción son las palabras que se utilizan en los mercados con respecto al concepto de tener un valor esperado para la demanda en el futuro (Abdel-Aal, 2008).

#### 2.3.1. Tipos de modelos energéticos

Un método común de clasificación son los modelos arriba hacia abajo “Top-Down” y de abajo hacia arriba “Bottom-Up”. Los modelos Top-Down tienden a centrarse en un nivel agregado de análisis, mientras que los modelos Bottom-Up identifican las actividades homogéneas o usos para los que se pronostica la demanda.

También existen otros tipos de clasificaciones para los modelos, los cuales pueden ser apreciados en la Figura 12.

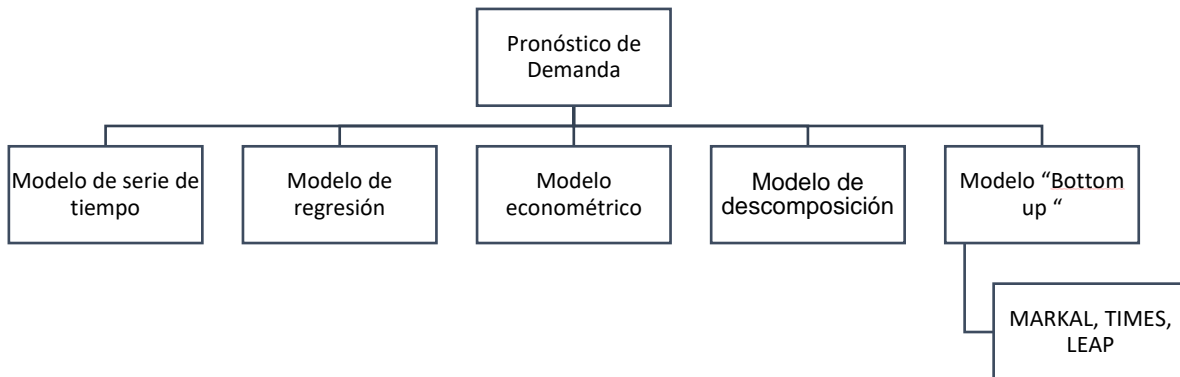


Figura 12. Tipos De Clasificaciones De Modelos De Pronóstico De Demanda. Elaboración propia.

La Tabla 2 muestra las diferencias generales entre las dos clasificaciones de modelos más comunes, Bottom-Up y Top-Down.

Tabla 2. Diferencias entre tipos de modelos. Elaboración propia con datos de Yasar., 2017.

Modelo Top-Down	Modelo Bottom-Up
Enfoque económico.	Utiliza un enfoque ingenieril.
No puede representar explícitamente tecnologías.	Da estimaciones optimistas sobre el "mejor" rendimiento.
Determina la demanda de energía a través de factores económicos.	Permite una descripción detallada de las tecnologías.
Supone que no hay discontinuidades en las tendencias históricas.	Son independientes del comportamiento de mercado observado.
Se basan en el comportamiento observado del mercado.	Evalúa los costos de las opciones tecnológicas directamente.
Da estimaciones pesimistas sobre el "mejor" desempeño.	Supone que las interacciones entre el sector energético y otros sectores son despreciables.

Según la Agencia Internacional de Energía Atómica (AEA, por sus siglas en inglés) 2006, el Modelo para el Análisis de la Demanda de Energía (MAED) evalúa la demanda energética futura en función de escenarios a mediano y largo plazo de desarrollos socioeconómicos, tecnológicos, así como también demográficos.

El modelo relaciona sistemáticamente la demanda energética específica para producir diversos bienes y servicios identificados, con los factores sociales, económicos y tecnológicos correspondientes que afectan esta demanda.

Dentro del modelo MAED, la naturaleza y el nivel de la demanda de bienes y servicios son función de varios factores determinantes, que incluyen;

- Crecimiento de la población.
- Número de habitantes por vivienda.
- Número de aparatos eléctricos utilizados en los hogares.
- Movilidad y preferencias de las personas por los modos de transporte.
- Prioridades nacionales para el desarrollo de ciertas industrias o sectores económicos.
- La evolución de la eficiencia de ciertos tipos de equipos, mercado penetración de nuevas tecnologías o formas de energía.

Zonooz *et al.*, (2009), describieron otro modelo llamado MARKAL (acrónimo de MARKet ALlocation). Es una técnica dinámica de bottom-up ampliamente aplicada, original y principalmente un modelo de programación lineal (PL) desarrollado por el Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP) de la Agencia Internacional de Energía (IEA., 2001).

Seebregts *et al.*, (2001) comentan que el modelo MARKAL representa los lados de la oferta y la demanda del sistema energético. Dicho modelo proporciona a los encargados de la formulación de políticas, como también a los planificadores de los sectores tanto públicos como privados, detalles exhaustivos sobre las tecnologías de producción y consumo de energía, además, este modelo puede proporcionar una comprensión de la interacción entre las macroeconomías y el uso de energía.

- Algunos usos de MARKAL incluyen:

- Identificación de sistemas de energía y estrategias de inversión de menor costo.
- Identificar respuestas rentables a las restricciones sobre emisiones y desechos ambientales bajo los principios del desarrollo sostenible.
- Realización de análisis prospectivo de saldos energéticos a largo plazo bajo diferentes escenarios.

### 2.3.2. Plataformas de desarrollo

Montilva *et al.*, (2003) describen a las plataformas de desarrollo como el ambiente o entorno de *software* común en el cual se desenvuelve la programación de un grupo definido de aplicaciones.

Algunos de los *softwares* para la modelación de demanda energética son;

Open Source Energy MOdelling System (OSeMOSYS), diseñado específicamente como una herramienta para informar el desarrollo de estrategias energéticas locales, nacionales y multirregionales y apoyarlas con actividades de desarrollo de capacidades (Howels *et al.*, 2011).

La herramienta OSeMOSYS fue desarrollada en colaboración con una variedad de instituciones, incluida la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), KTH Royal Institute of Technology, Stanford University, University College London (UCL), University of Cape Town (UCT), Paul Scherrer Institute (PSI), Stockholm Environment Institute (SEI) y North Carolina State University. La primera versión de OSeMOSYS se puso a disposición en 2008, mientras que la primera publicación revisada por pares que describe su carácter y estructura estuvo disponible en 2011. Es un marco de modelado determinista, de optimización lineal y de largo plazo. La programación lineal de enteros mixtos se puede aplicar para ciertas funciones, como la optimización de expansiones discretas de la capacidad de la planta de energía.

Otra herramienta de modelación es The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES), fue desarrollado por Energy Technology Systems Analysis Program como una metodología para realizar análisis energéticos y ambientales en profundidad.

El generador de modelos TIMES combina dos enfoques diferentes y complementarios para modelar energía: un enfoque de ingeniería técnica y un enfoque económico (Loulou *et al.*, 2005). Es un generador de modelos tipo *Bottom-Up*, rico en tecnología, que utiliza programación lineal para producir un sistema de energía de menor costo, optimizado de acuerdo con una serie de restricciones del usuario, en horizontes temporales a mediano y largo plazo.

Una herramienta de modelación adicional a las anteriormente descritas es el Long-range Energy Alternatives Planning System (LEAP). Es una herramienta de *software* ampliamente utilizada para el análisis de políticas energéticas y la evaluación de la mitigación del cambio climático desarrollada en el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (Heaps, 2016). Sus usuarios incluyen agencias gubernamentales, académicos, organizaciones no gubernamentales, empresas consultoras y empresas de servicios de energía. El software ha sido utilizado con éxito en muchas escalas diferentes, desde ciudades, estados hasta aplicaciones nacionales, regionales y globales.

# Capítulo 3. Sector transporte en México y plataformas de desarrollo para modelación

## 3.1. Información histórica del sector transporte

Según los datos reportados por la SENER-SIEB (2020), en el periodo de tiempo transcurrido del año 2010 hasta el año 2017 la cantidad de vehículos registrados en el parque vehicular mexicano se incrementó en un 31%. En la Figura 13 puede ser apreciado el comportamiento de variación. Resalta el incremento en motocicletas y la contracción de los camiones de carga.

La Figura 14 muestra las variaciones en el crecimiento dentro del parque vehicular del 2010 hasta el 2017. La tecnología de automóvil es la que ha presentado un crecimiento constante durante el periodo de tiempo evaluado, siendo el medio de transporte más recurrente.

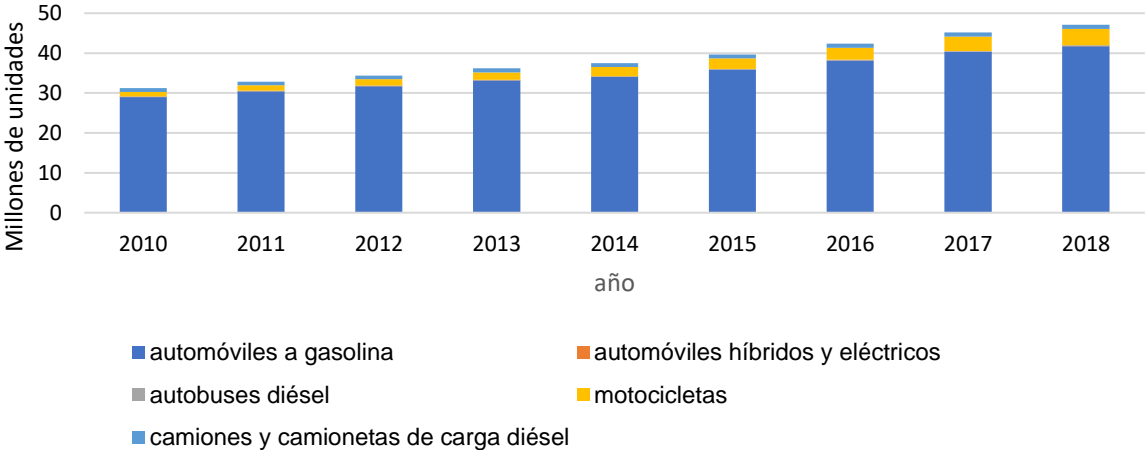


Figura 13. Comportamiento Histórico Del Sector Transporte En México (2010-2017). Elaboración propia con datos de SENER (SENER-SIEb, 2020).



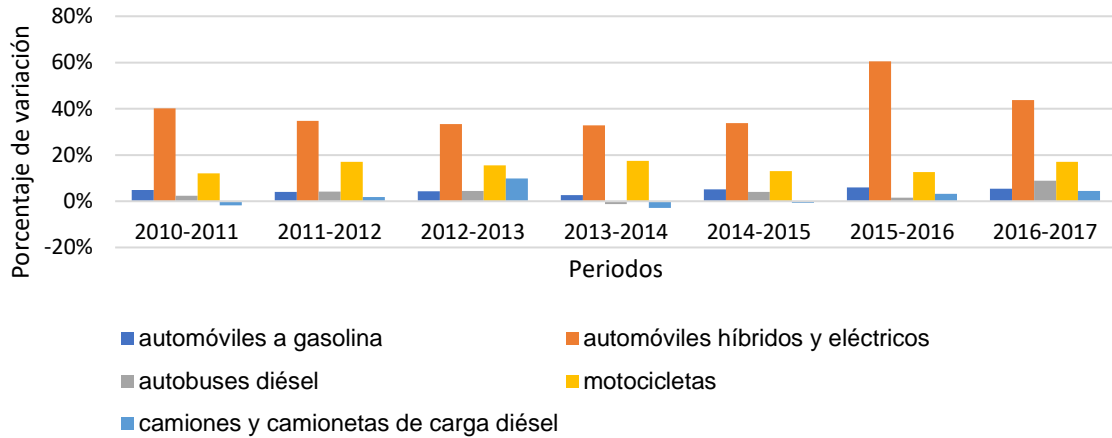


Figura 14. Comportamiento de crecimiento del parque vehicular (2010-2017). Elaboración propia con datos de SENER ((SENER-SIEc, 2020).

En la Figura 15 se puede apreciar que las ventas realizadas por el sector comercial de vehículos automóviles han ido al alza de manera constante hasta llegar al año 2016. En el año 2017 se vendieron más de 1,500,000 unidades.

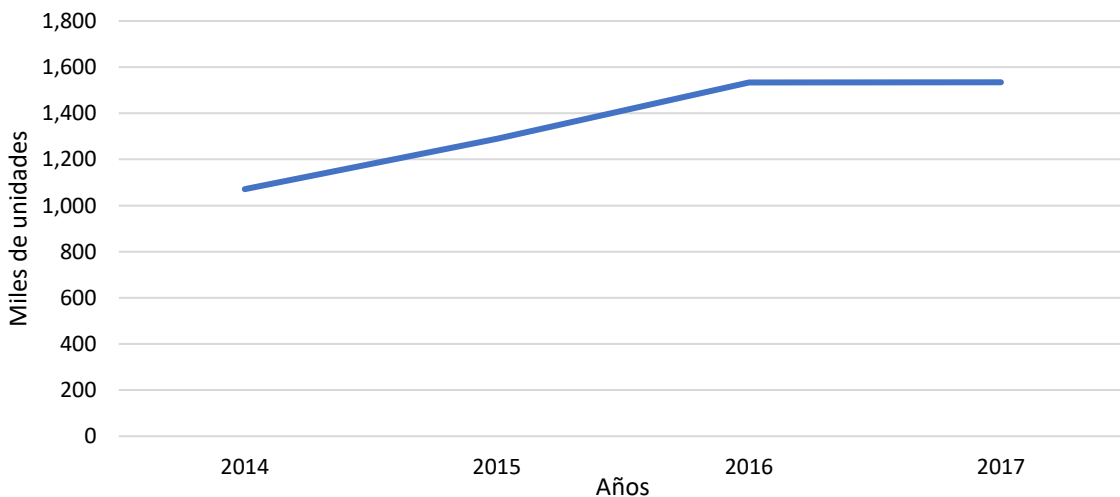


Figura 15. Ventas anuales totales de automóviles (2014-2017). Elaboración propia con datos del INEGI (INEGIc, 2020).

Las ventas de camiones de carga del año 2014 al 2017 también se han mantenido constantes, llegando a ser en el año 2017 de 35,000 unidades vendidas (Figura 16).

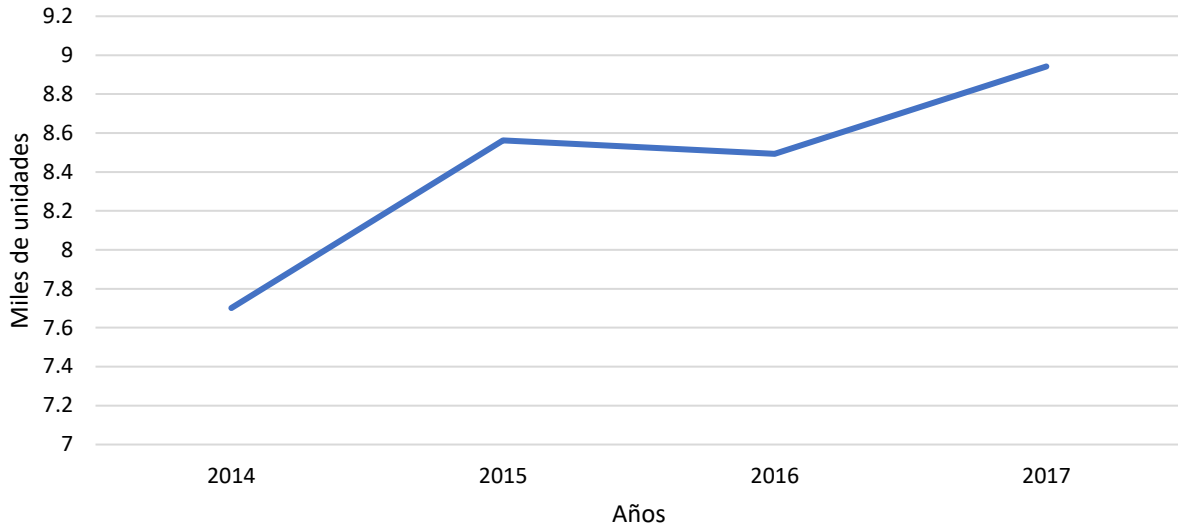


Figura 16. Ventas anuales de camiones de carga. Elaboración propia con datos del INEGI (INEGI, 2020).

Para el periodo 2014 - 2015 se presentó un incremento de ventas de camiones de pasajeros, sin embargo, del 2015 al 2016 las ventas fueron a la baja. Para el siguiente año las ventas repuntaron, llegando a ser 9 mil unidades vendidas (Figura 17).

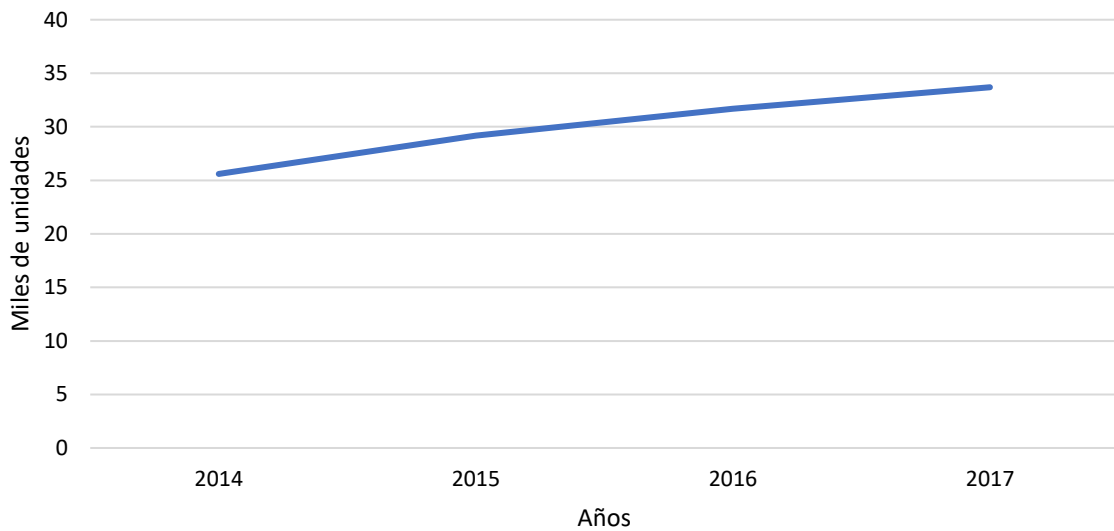


Figura 17. Venta histórica de camiones de pasajeros. Elaboración propia con datos del INEGI (INEGI, 2020).

### 3.2. Definición de indicadores socioeconómicos y ambientales

Para Bhattacharyya (2009), los modelos estructurales generalmente determinan la demanda de combustible de transporte mediante un proceso de dos etapas. En la primera etapa, la demanda de servicios de transporte está relacionada con la distancia recorrida por los pasajeros (indicada por kilómetros de pasajero) y el transporte de carga (indicado por toneladas de kilómetros). Para estos dos tipos de demanda de transporte, se utilizan las teorías básicas de la demanda del consumidor y del productor. La segunda etapa de demanda de pasajeros, se supone que los individuos maximizan su utilidad mediante la selección óptima de sus bienes y servicios que operan dentro de sus restricciones presupuestarias.

A medida que aumenta el nivel de ingresos personales en un país en desarrollo, el acceso a más bienes manufacturados de uso final afecta tanto la cantidad como el tipo de demanda de energía (Bauer, 2003).

En el año 2016, la Comisión Nacional Para El Uso Eficiente De La Energía (CONUEE), registró que, en México, el total de kilómetros recorridos en un año para el tipo de vehículo denominado auto fue de 13,378.22 km. En la Tabla 3 se pueden apreciar las distancias recorridas por diferentes medios de transporte a lo largo de un periodo de 4 años.

Tabla 3. Kilómetros Recorridos Por año. Elaboración Propia, Datos SENER (SENER-SIEd, 2020).

	Unidad	2014	2015	2016	2017
<b>Autos</b>	km/año	13,419.2	13,175.4	13,378.2	11,940.4
<b>Autobuses de pasajeros</b>	km/año	49,365.7	49,742.0	50,573.3	45,768.3
<b>Camionetas</b>	km/año	10,911.5	10,815.0	11,301.7	6,950.2
<b>Motocicletas</b>	km/año	6,339.0	6,488.5	6,142.8	4,800.4
<b>Camiones de carga</b>	km/año	32,162.8	35,106.4	33,555.6	31,331.7

También es importante resaltar las variaciones en las distancias recorridas por pasajero en automóviles y en autotransportes federales (autobuses de pasajeros). La distancia recorrida por autobuses de pasajeros es 72% mayor a la realizada por autos particulares. La Tabla 4 presenta los datos registrados por CONUEE a lo largo de 4 años.

Tabla 4. Kilómetros recorridos por pasajero. Elaboración propia datos de SENER (SENER-SIEe, 2020).

	Unidad	2014	2015	2016	2017
<b>Pasajeros kilómetro por automóvil</b>	pasajeros/ km	56,3005.6	58,8145.0	640,832.0	602,014.2
<b>Pasajeros kilómetro por autotransporte federal</b>	pasajeros/ km	50,5794.9	520,380.6	531,105.3	17,685,81.3

Para el caso del transporte de carga por carretera CONUEE también presenta una medición de las distancias recorridas por tonelada de mercancía transportada (Tabla 5).

Tabla 5. Toneladas-kilómetro Recorridos. Elaboración Propia Datos De SENER (SENER-SIEf, 2020).

	Unidad	2014	2015	2016	2017
<b>Toneladas kilómetro por carretera</b>	toneladas/km	266,765.6	272617.7	279,537.4	285,598.4

La Figura 18 muestra el comportamiento histórico del incremento poblacional desde 1910, hasta llegar al año 2020, el incremento poblacional promedio fue de 13.48%.

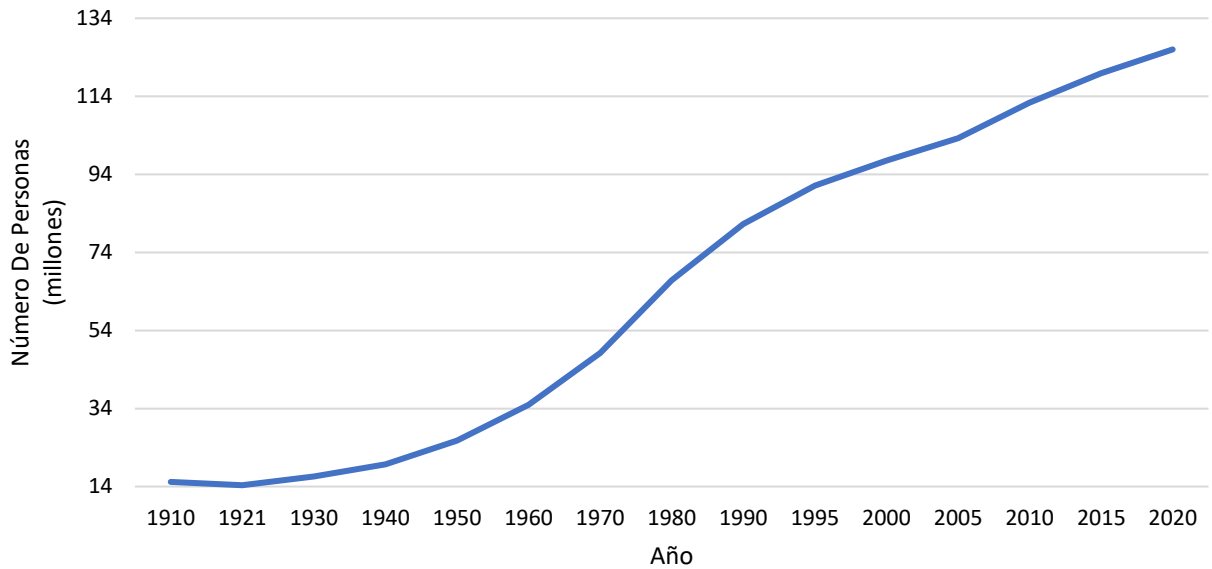


Figura 18. Crecimiento poblacional en México (2010-2018). Elaboración propia con datos del Banco Mundial. (BMa,2020).

Para Bauer (1996), el PIB resulta de utilidad para el análisis del crecimiento del sector transporte puesto que las opciones que ejerce la población consumidora dependen no solo de la cantidad de ingresos disponibles más allá de las necesidades básicas, sino también de los impulsores culturales y sociales. Lo anterior puede explicar el aumento abrupto observado en la proporción de los ingresos dedicados por los individuos al transporte y la comunicación (Banco Mundial, 1998) citado por Bauer (2003) y el consiguiente aumento rápido de la propiedad del automóvil tan pronto como se alcanza un cierto rango de ingresos (Soligo y Medlock III, 1997).

Las variaciones del PIB per cápita a nivel nacional puede ser apreciadas en la Figura 19.

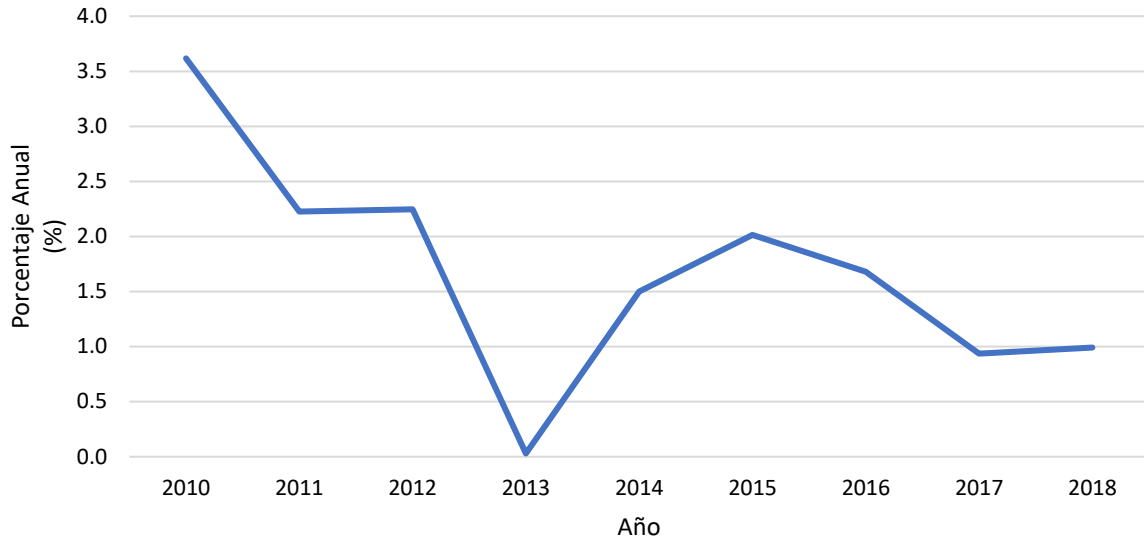


Figura 19. Crecimiento Del PIB Per Cápita (% anual) En México. Elaboración Propia Con Datos Del Banco Mundial (BMb, 2020).

Es importante contar con la relación PIB y crecimiento poblacional, puesto que ambos rubros podrían estar ligados al incremento de la matrícula vehicular en el país. La Figura 20 presenta el crecimiento poblacional en porcentaje y las variaciones del PIB en porcentaje, año con año en la serie de tiempo descrita.

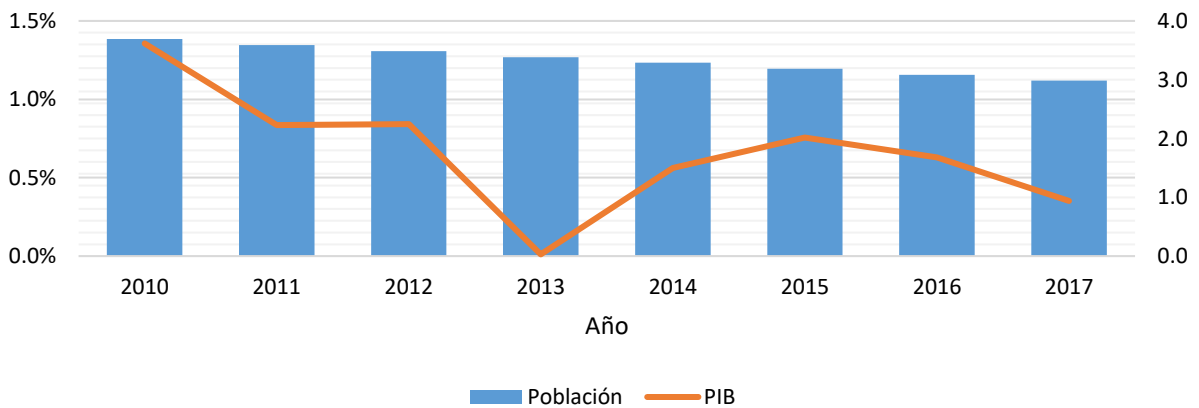


Figura 20. Crecimiento poblacional y PIB en México (2010-2017). Elaboración propia con datos: Banco Mundial (BMc, 2020).

La información presentada en esta sección se compone de diferentes datos recopilados de múltiples fuentes oficiales, los cuales fueron organizados de manera ordenada con el propósito de brindar un marco numérico que represente la situación histórica de los datos seleccionados para integrar un modelo energético del sector transporte de pasajeros y carga en México que resulte capaz de simular situaciones hipotéticas del sector en cuestión para su posterior análisis.

### 3.3. Plataforma de desarrollo

Se ha decidido utilizar un modelo de análisis tipo Bottom-Up, empleando el *software* de análisis Sistema de Planificación de Alternativas Energéticas de Largo Alcance, (LEAP, por sus siglas en inglés). LEAP resulta ser una herramienta ampliamente utilizada para la política energética, análisis y evaluación de mitigación del cambio climático desarrollado por el Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo (SEI, por sus siglas en inglés) (Quijano Hurtado, 2008). Una de las ventajas que presenta este *software* en comparación con otras herramientas de análisis es que fue diseñada específicamente para realizar diferentes escenarios energéticos utilizando la metodología Bottom-Up.

El software LEAP ha sido utilizado en diferentes análisis energéticos en distintos países. En la Tabla 6 se ejemplifican diferentes trabajos de investigación realizados con el software LEAP.

Tabla 6. investigaciones realizadas que han empleado LEAP. Elaboración propia.

Título Del Proyecto	País De Aplicación	Año De Aplicación
Toward a Low-Carbon Transport Sector in Mexico	México	2020
Achieving Sustainable Development Goals in Nigeria's Power Sector	Nigeria	2019
EnergyVision 2030 (for the Northeast United States)	Estados Unidos De Norte América	2017
GREAT: The Green Resources & Energy Analysis Tool for China	China	2016
Plataforma Escenarios Energéticos Argentina 2035	Argentina	2015
CO <sub>2</sub> Emissions Reduction in Japan's Power Sector	Japón	2003

En México el modelo LEAP ha sido utilizado para evaluar los potenciales de reducción de emisiones de GEI a mediano plazo del sector industrial. El análisis proviene de la Propuesta de Instrumentos para facilitar medidas de eficiencia energética en el sector industrial de México, desarrollado por la CONUEE, la Unión Europea, la GIZ de Alemania y la Fundación Bariloche de Argentina, publicado el 19 de septiembre de 2018 en el portal de la CONUEE (GIZ, 2018).



Con respecto al estudio del sector transporte en México, el trabajo titulado *Toward a Low-Carbon Transport Sector in Mexico* elaborado por Islas-Samperio *et al.*, (2020), es el único estudio que utiliza LEAP para analizar el sector transporte nacional.

Un beneficio clave de LEAP es su relativamente bajo requisito de datos iniciales. Muchas herramientas de modelado se basan en algoritmos de solución muy particulares y, a menudo, bastante complejos, como la optimización, por lo que tienden a tener requisitos de datos muy inflexibles.

LEAP ofrece una variedad de metodologías de modelado, muchos aspectos de este son opcionales, por lo tanto, tiene requisitos de datos iniciales mucho más bajos y permite comenzar a construir modelos basados en principios de contabilidad relativamente simples.

### 3.3.1. Descripción de la plataforma

LEAP es una herramienta de modelado integrada basada en escenarios que se puede utilizar para rastrear el consumo de energía, la producción y la extracción de recursos en todos los sectores de una economía. Su desarrollo fue planeado para utilizar las fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero (GEI) tanto del sector energético como del no energético.

LEAP también puede ser utilizado para analizar las emisiones de contaminantes atmosféricos locales, regionales, contaminantes climáticos de corta duración, lo que lo hace muy adecuado para estudios de cobeneficios climáticos de la reducción de la contaminación atmosférica local.

El *software* incluye una base de datos de tecnología que en conjunto con la información de efectos ambientales describe las características técnicas, los costos, así como los impactos ambientales de una gama de tecnologías energéticas, incluidas las ya existentes, las mejores prácticas actuales y los dispositivos de próxima generación.

LEAP es una plataforma que permite realizar diferentes tipos de análisis energéticos. El *software* también incluye una gama de metodologías especializadas opcionales que incluyen modelos de rotación de existencias para áreas como la planificación del transporte. Por el lado de la oferta, LEAP proporciona una gama de metodologías de contabilidad, simulación y optimización que son lo suficientemente potentes para modelar la generación del sector eléctrico y la planificación de expansión de capacidad, así como también son lo suficientemente flexibles y transparentes para permitir que LEAP incorpore fácilmente datos y resultados de otros modelos especializados.

### 3.3.2. Descripción de módulos

Los módulos de análisis disponibles que pueden ser utilizados son:

- Análisis de demanda por tecnología

El análisis de la demanda es un enfoque desagregado basado en el uso final para modelar los requisitos para el consumo de energía final del sistema en estudio. Puede ser empleado usando información económica, demográfica y de uso de energía para construir escenarios alternativos que examinen cómo el consumo total y desagregado de combustibles finales evoluciona con el tiempo en todos los sectores de la economía. Otra función es la de examinar los costos y las implicaciones ambientales de cada escenario.

Las ramas de tecnología de demanda pueden aparecer de tres formas diferentes, según el tipo de metodología de análisis de demanda elegido. Estas metodologías son: análisis de actividad, de existencias y de transporte.

La modalidad de análisis de transporte resulta de especial interés para los fines del presente trabajo. Este enfoque de análisis permite especificar factores de emisión por unidad de distancia recorrida por un vehículo (por ejemplo, gramos / vehículo-kilometro).

- Análisis de oferta

Se usan para indicar tanto grupos de procesos y fuentes de salida, así como los principales “módulos” de conversión de energía: Centrales Eléctricas, refinerías extracción de recursos.

En esta, la metodología el consumo de energía se calcula como el producto de un nivel de actividad y una intensidad energética anual (uso de energía por unidad de actividad). Las actividades generales se definen como los productos de las acciones individuales ingresadas a lo largo de una rama completa del árbol de demanda.

## Capítulo 4. Metodología

La metodología utilizada se denomina análisis de rotación de stock de transporte propuesta por LEAP, (Heaps, 2008). Dicha metodología consiste en una estimación de emisiones de abajo hacia arriba (Bottom-Up), el cual incluye las variables de crecimiento histórico del parque vehicular, kilometraje anual por vehículo, eficiencia de motores, tipo de combustible utilizado, factor de emisión de CO<sub>2</sub> de las fuentes energéticas y perfil de supervivencia de los vehículos.

El procedimiento de rotación de stock de transporte enfatiza las diferencias entre las diversas características de los vehículos de distintas edades. Las características de los vehículos cambiarán a medida que envejeczan (perfiles de emisiones, kilómetros recorridos, economía de combustible, etc.)

La metodología tiene como principal función mostrar cómo las políticas de transporte que afectan a los vehículos más recientes (por ejemplo, nuevos estándares de ahorro de combustible y estándares de emisiones) tendrán un impacto gradual a medida que se retiren los vehículos más antiguos y se compren los más nuevos

Como paso inicial hacia la generación del modelo LEAP del sector de autotransporte se realizó un análisis de las bases de datos referentes al parque vehicular histórico en México. Derivado del análisis del sector, se propuso una clasificación nueva para el parque vehicular existente, en donde los tipos de vehículos fueron clasificados en dos sectores; de carga y de pasajeros. El sector de pasajeros se compone tanto de automóviles, autobuses y de motocicletas, mientras que la composición del sector de carga es la suma de camiones y camionetas unidos en un solo parámetro. Con respecto a los combustibles de cada sector, la gasolina se seleccionó como fuente energética para los automóviles de combustión interna y motocicletas, para los camiones de pasajeros se empleó diésel como combustible, también fueron incluidos los vehículos eléctricos teniendo como fuente energética la electricidad. En el segundo sector, de carga, se selecciona el diésel como fuente energética. La nueva clasificación se representa en la Figura 21.

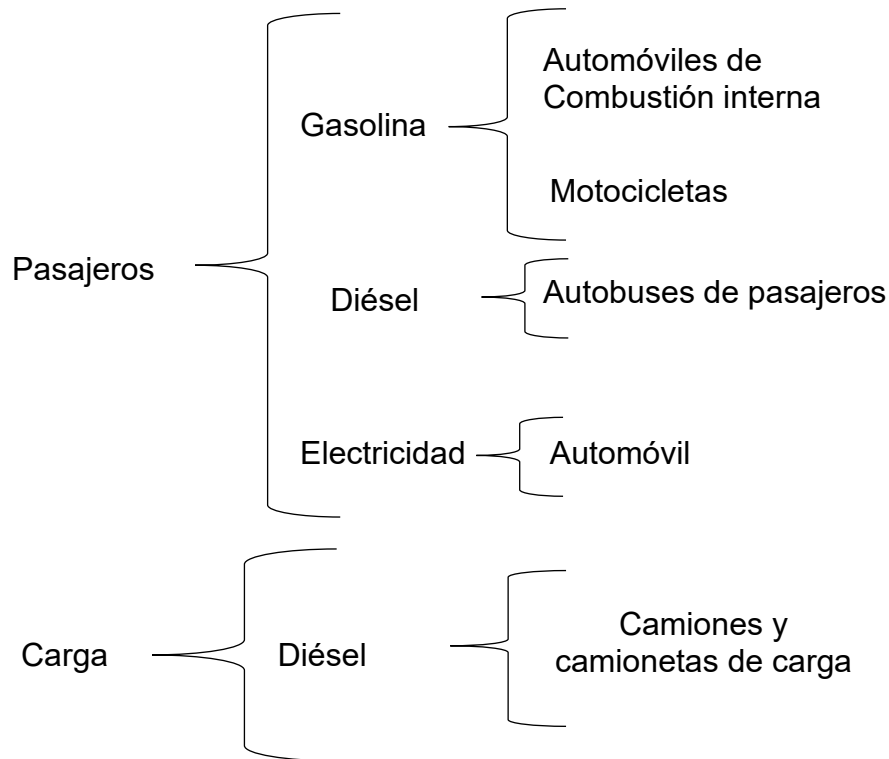


Figura 21. Clasificación del parque vehicular para su análisis. Elaboración propia.

Para el desarrollo general del modelo energético del presente estudio se utilizaron diferentes parámetros presentados en la Figura 22. La información requerida por el modelo se integra por el parque vehicular existente en el año base, la eficiencia de combustión del motor, tipos de combustibles que utilizan los vehículos, entre otros. Mediante el uso del *software*, todos los parámetros de entrada del modelo fueron analizados para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas a lo largo del periodo de tiempo, las variaciones en las cantidades del parque vehicular y los cambios en la demanda del consumo de energía del sector.

Una vez identificados los parámetros a utilizar se procedió a la elaboración de un escenario base (BAU, por sus siglas en inglés), el cual fue utilizado para la proyección a futuro del crecimiento del parque vehicular, así como también para determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> emitidas por el sector.

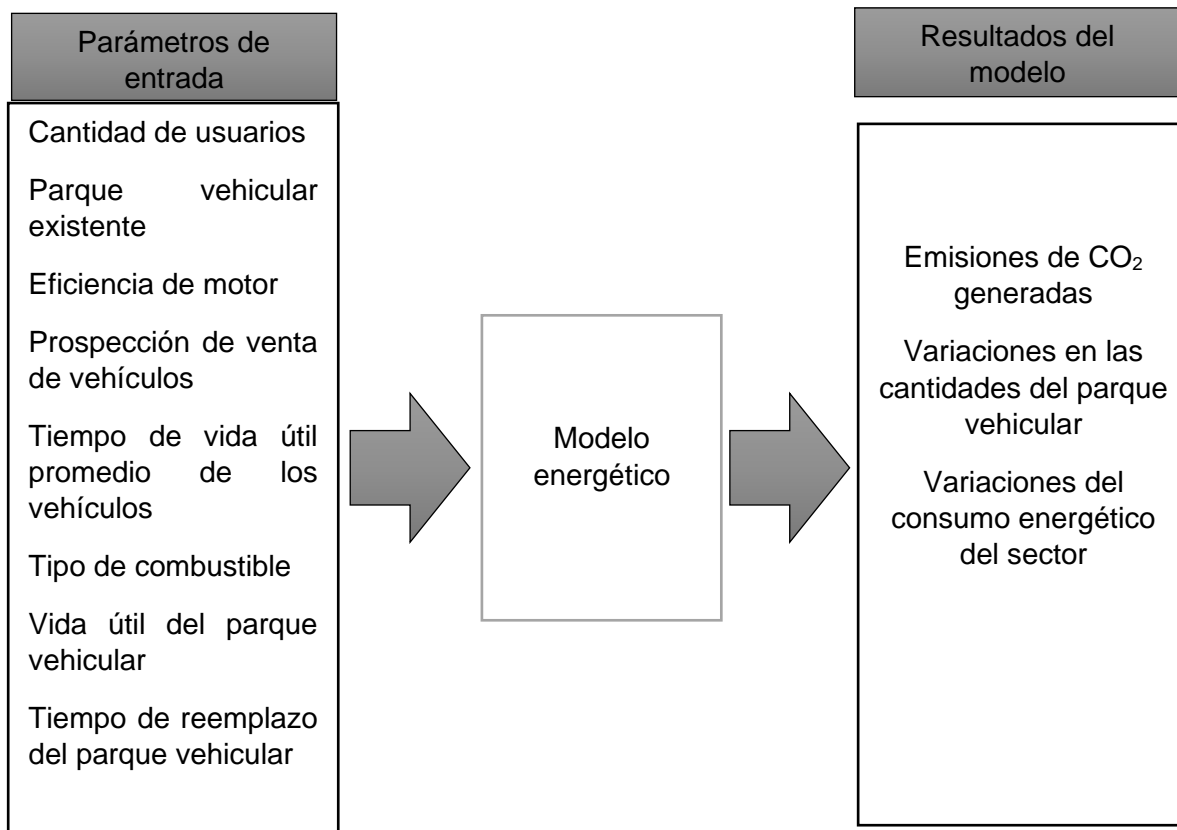


Figura 22. Estructura general del sistema modelado. Elaboración propia.

Para el desarrollo de las estimaciones de crecimiento y emisiones del escenario BAU se consideraron tres etapas. La primera se refiere a los datos de entrada, tales como total del parque vehicular en México, información de las ventas de los diferentes vehículos entre otros datos. La segunda etapa corresponde a los criterios de funcionamiento del modelo BAU, haciendo referencia a los cambios previstos a futuro que pueden ocurrir para el sector autotransporte en México. Finalmente, la tercera etapa comprende los resultados de las estimaciones sobre emisiones, derivadas del análisis del modelo.

La Figura 23 ejemplifica las etapas que componen al escenario BAU. Las interacciones entre las variables de entrada, la clasificación previamente mencionada del parque vehicular, junto con las fuentes energéticas son los fundamentos del sistema que dan como resultado la demanda energética a futuro, el crecimiento del parque vehicular y las emisiones de CO<sub>2</sub> de los años posteriores.

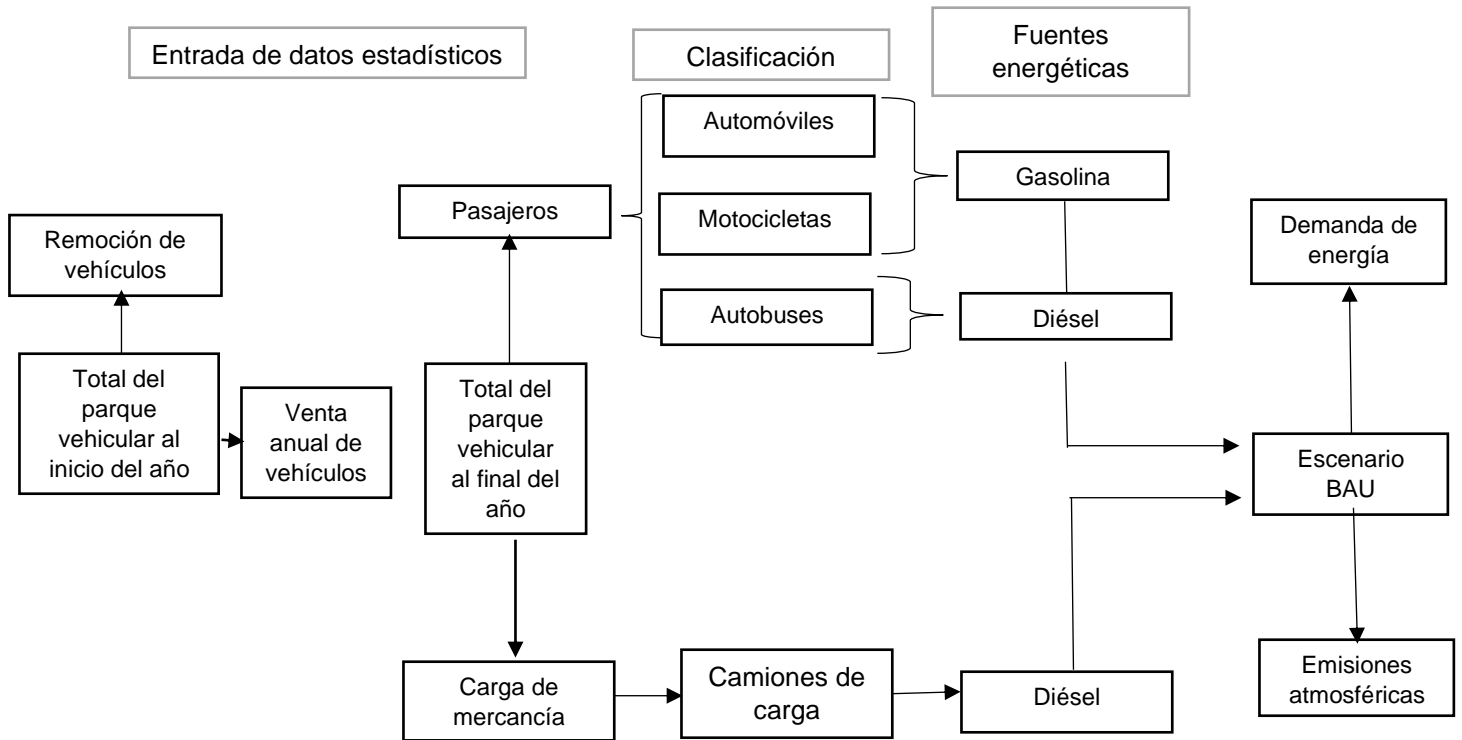


Figura 23. Esquema del Escenario BAU.

#### 4.1 Componentes del escenario BAU

El escenario BAU utiliza condiciones de operación sin cambio alguno en cuanto a mejoras en rendimiento de combustible, cambios de fuentes energéticas o medidas de eficiencia energética en la flota vehicular. Se destaca también que para dicha etapa del modelo las políticas de movilidad en México permanecerán intactas a lo largo del periodo evaluado. Se considera como año inicial del modelo el 2014, y su fin de modelación se seleccionó en el 2050.

Para el cálculo de la cantidad de vehículos existentes para cada tecnología de transporte se utiliza la siguiente formula:

$$Stock_{t,y,v} = (Ventas_{t,v} * Supervivencia_{t,y-v}) \quad (1)$$

$$Stock_{t,y} = \sum Stock_{t,v,y} \quad (2)$$

en donde  $t$  es el tipo de vehículo,  $v$  es el año del modelo,  $y$  es el año en el calendario,  $ventas$  es el número de vehículos adicionados a un año en particular,  $stock$  es la cantidad de vehículos existentes en un año determinado,  $supervivencia$  es la fracción de vehículos sobrevivientes después de un lapso (perfil de supervivencia).

Para los datos estadísticos de entrada se utilizaron datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y Portal de Indicadores de Eficiencia Energética y Emisiones Vehiculares de la Comisión Nacional Para El Uso Eficiente de la Energía.

En total en el año 2014 fueron vendidas 2,562,448 unidades de transporte. Siendo el 99% de pasajeros el restante 1% de carga. Las cifras exactas pueden ser consultadas en la Tabla 7.

*Tabla 7. Venta de vehículos, año 2014.*

<b>Tipo</b>	<b>Unidades</b>
Automóviles	2,196,591
Autobuses	4,810
Motocicletas	338,636
Camión de carga	23,041

Las eficiencias para cada tipo de transporte fueron consultadas de la base de datos en línea del Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norte América (Fueleconomy, 2020). Los parámetros se presentan en la Tabla 8.

*Tabla 8. Eficiencia promedio por tipo de vehículo.*

<b>Tipo</b>	<b>Unidades km/l</b>
Automóviles	13.1
Autobuses	1.8
Motocicletas	9.8
Camión de carga	3.1

La característica principal del escenario BAU es la proyección a futuro del crecimiento histórico anual de la flota vehicular que componen al modelo, cabe



resaltar que el escenario no contempla cambio alguno en los factores de crecimiento. El incremento del parque vehicular fue en promedio del 5% anual. Con dicha información se puede proceder a la cuantificación del total del parque vehicular, junto con la estimación de emisiones de gases de CO<sub>2</sub>.

Una vez finalizado la construcción del escenario BAU se procedió a la elaboración de tres escenarios de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### 4.2 Escenarios de reducción de emisiones

Los dos escenarios a continuación descritos inciden de manera directa sobre los resultados del BAU. La finalidad de dichos escenarios es identificar las posibles reducciones de CO<sub>2</sub> que se podrían generar derivado de la aplicación de diferentes políticas ambientales enfocadas al sector de autotransporte en México.

##### 4.2.1 Mejora en rendimiento del motor

El primer escenario de reducción de CO<sub>2</sub> consiste en la aplicación de mejoras con respecto al rendimiento de combustible de los vehículos. La medida solamente se aplica para el subsector de autotransporte de pasajeros, específicamente para el automóvil. La acción implementada propone una mejora del rendimiento del automóvil del 0.5% para el año 2025, 1% en 2030 y 1.5% para el 2035.

##### 4.2.2 Impulso en la electromovilidad

Esta medida tiene como objetivo aumentar la participación de los vehículos eléctricos en el parque vehicular de México. Este escenario contempla que para el año 2030 el 50% de los vehículos sean eléctricos.

##### 4.2.3 Uso de bioetanol E15

La Norma Oficial Mexicana 016 de la Comisión Reguladora de Energía (NOM-016-CRE-2016, 2016) dicta que el contenido de etanol en la mezcla de combustible no debe pasar del 10%, sin embargo, para el presente estudio se propone un incremento en el máximo permitido de 5% en automóviles de pasajeros. Lo anterior se fundamenta en el uso de bioetanol E15 en la Unión Americana como medida para la disminución de contaminantes atmosféricos provenientes del transporte.

Actualmente no existe ningún plan nacional para el fomento del bioetanol E15, por lo que en el presente trabajo se propone un incremento en el uso del 6.7% hacia el año 2032.

## Capítulo 5. Resultados

Los resultados de los cuatro escenarios: BAU, mejora en rendimiento, impulso en electro movilidad y uso de bioetanol E15 se dividen en tres parámetros; variaciones en el parque vehicular, demanda energética y emisiones de CO<sub>2</sub> generadas.

### 5.1. Variaciones del parque vehicular

La Figura 24 muestra la tendencia de crecimiento proyectada en el escenario BAU para el parque vehicular en donde destaca el incremento en la cantidad de autotransporte de pasajeros superando la cantidad de vehículos de transporte de mercancía.

Para el año 2030 se proyecta un total de 72.8 millones de vehículos de pasajeros junto con 581 mil camiones de carga de mercancía. Para el año 2050 la cantidad de vehículos de transporte de pasajeros será de 537 millones, mientras que la cantidad de vehículos de carga será de 280 mil unidades. Debido a la diferencia de tres órdenes de magnitud entre ambos rubros la gráfica no representa en apariencia la cantidad de unidades de autotransporte de carga.

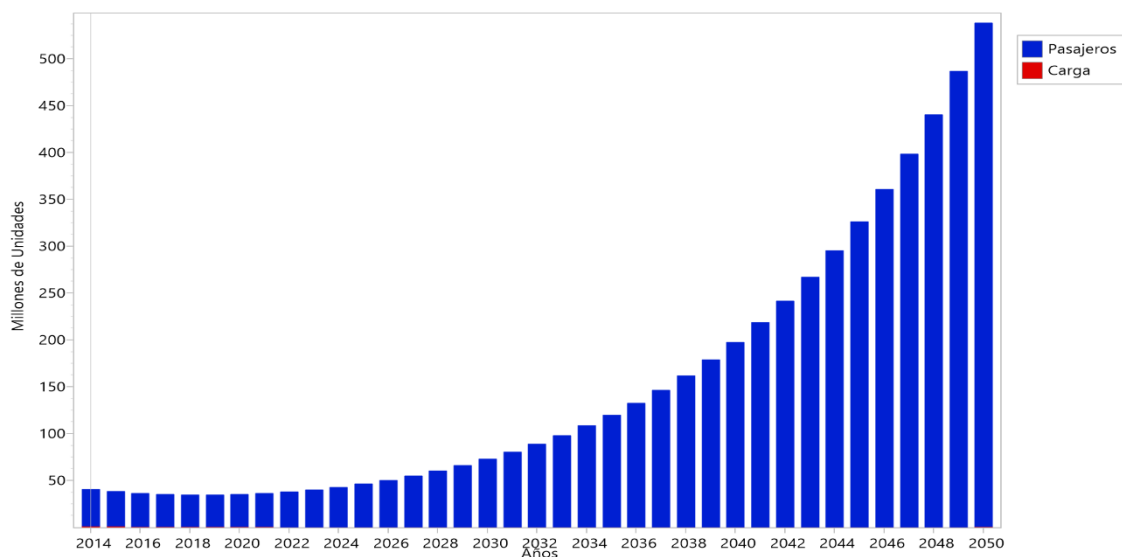


Figura 24. Proyección de variación del parque vehicular en México al año 2050.

Con respecto al crecimiento interno del sector transporte de pasajero la Figura 25 representa la integración de los diversos vehículos para el año 2030, que componen al subsector, destacando que un 58.3% del total está compuesto por vehículos de consumo de gasolina como fuente energética. Los resultados arrojan una participación del 41.5% de vehículos eléctricos en el parque vehicular mexicano.

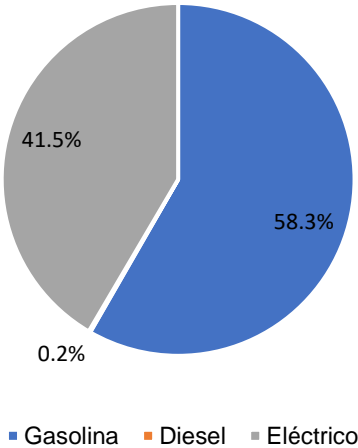


Figura 25. Composición del sector vehicular de pasajeros al año 2030.

Para el año 2050 el modelo proyecta que el sector transporte de pasajeros estará integrado en un 57.9% por vehículos de consumo de gasolina, mientras que los transportes eléctricos ocuparan un 41.9% de la composición total, tal observa en la Figura 26.

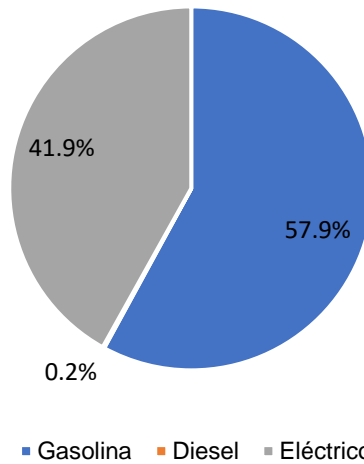


Figura 26. Composición del sector vehicular de pasajeros para el año 2050.

La composición de los vehículos de gasolina puede ser observada a detalle en la Tabla 9, en donde se proyecta que al año 2030 se tendrá un crecimiento en la cantidad de vehículos denominados automóvil de un 2% con respecto al año 2015 siendo éste el primer año proyectado en el modelo. Para el año 2050 la cantidad de automóviles habrá crecido en un 80% en comparación con el primer año proyectado. La cantidad de motocicletas también presenta un incremento a través del tiempo, llegando a representar un aumento del 97% para el año final de proyección en comparación con el año inicial.

Tabla 9. Composición de la flota vehicular a gasolina. Millones de unidades.

Tipo/Año	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Automóvil</b>	32.0	21.6	22.2	32.8	53.4	88.0	145.2	239.7
<b>Motocicleta</b>	2.7	3.7	5.9	9.6	15.9	26.3	43.4	71.6
<b>Total</b>	34.6	25.3	28.1	42.4	69.3	114.3	188.6	311.2

Para los autotransportes con fuente energética de diésel y eléctrica también se aprecian incrementos en las cantidades de sus respectivos parques vehiculares. La Tabla 10 muestra en periodos de 5 años las cantidades de vehículos proyectados. El autotransporte de pasajeros con diésel como fuente energética presentará dentro del periodo de análisis una reducción al año 2030 de un 54%, que contrasta con un incremento para el 2050 del 63% con respecto con el año inicial.

El autotransporte con fuente energética eléctrica presenta 93% de incremento al año 2030 y un 99% de aumento al año 2050 con respecto al año inicial en ambos casos.

*Tabla 10. Cantidad de unidades en rubros de diésel y eléctrico. Millones de unidades.*

<b>Tipo/Año</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2035</b>	<b>2040</b>	<b>2045</b>	<b>2050</b>
<b>Diésel</b>	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8
<b>Eléctrico</b>	9.1	17.8	30.2	50.0	82.6	136.4	225.1

Para el sector de transporte de carga, la Figura 27 muestra las variaciones en el total de vehículos a lo largo de los años proyectados. Se aprecia un descenso en la cantidad de unidades de transporte de carga, culminando en 280 mil unidades para el año 2050, esto representa más del doble de las unidades al inicio de las proyecciones del modelo.

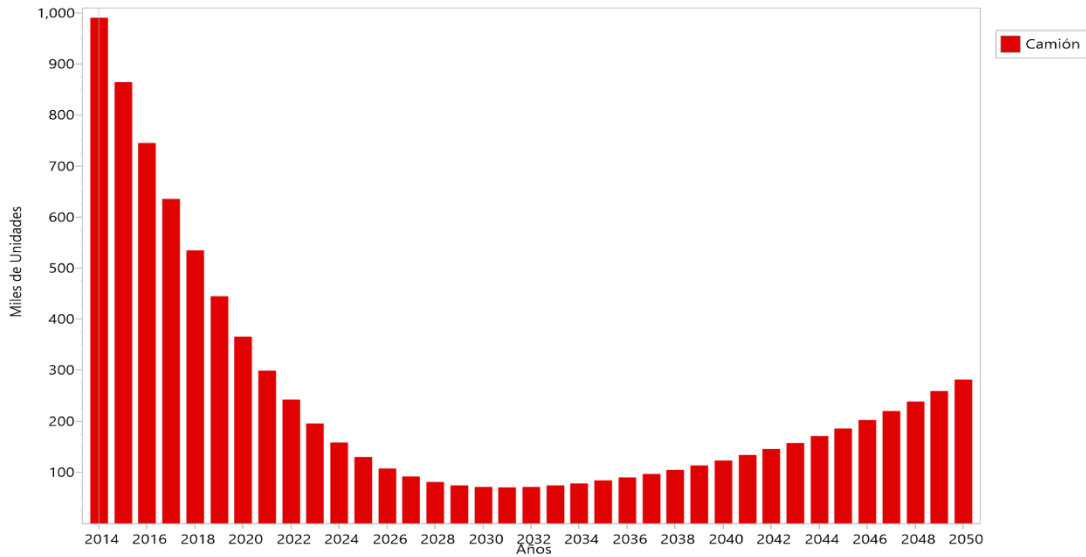


Figura 27. Variación en el parque vehicular de transporte de carga.

## 5.2. Demanda energética

Las proyecciones del modelo arrojan los siguientes datos. La demanda energética del total del parque vehicular tanto de pasajeros como de carga fue un total de 2.6 mil millones de GJ para el año 2030, para el año 2050 se obtendría un total de 19.2 mil millones de GJ consumidos. La Figura 28 muestra que el rubro de transporte de pasajeros es el mayor consumidor, siendo en promedio el 98.5% de energía consumida en total.

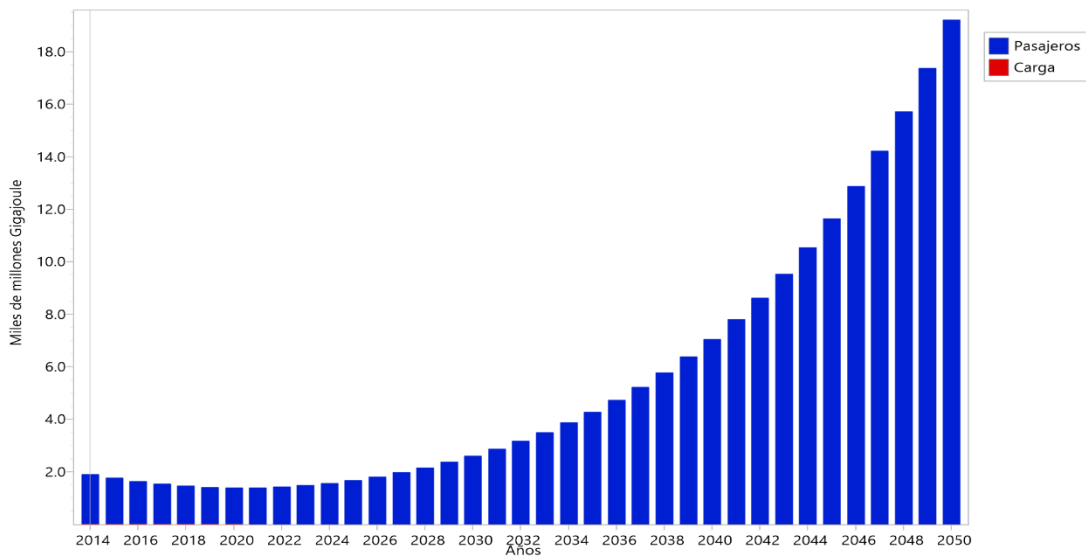


Figura 28. Proyección del consumo energético del sector autotransporte.

La Figura 29 expresa el comportamiento de consumo energético del subsector de transporte de pasajeros. Puede ser apreciado un incremento gradual e ininterrumpido en el consumo por parte del subsector mencionado.

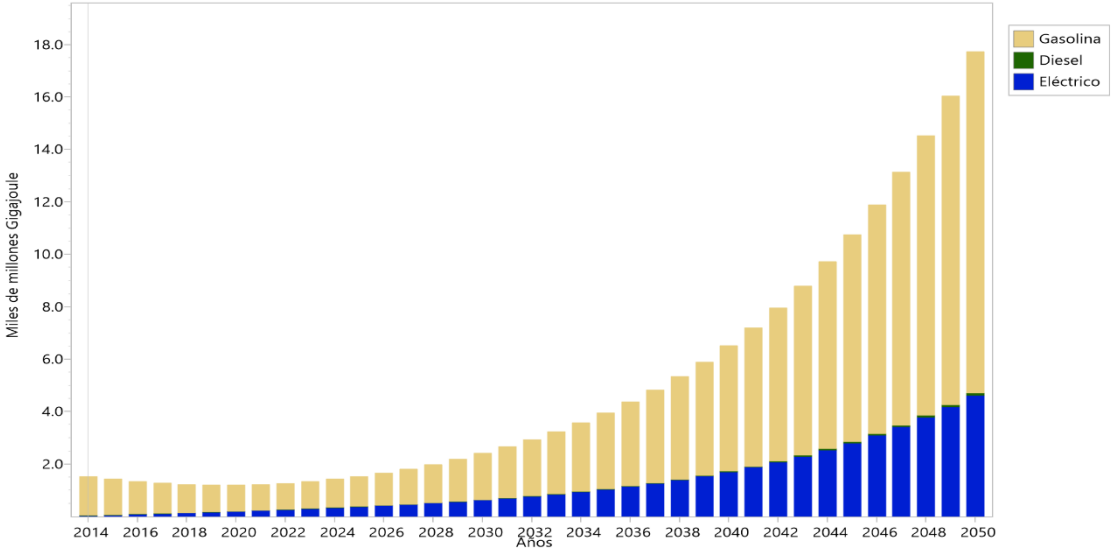


Figura 29. Proyección de consumo energético del subsector transporte de pasajeros.

Para el año 2030 los vehículos con fuente energética a gasolina habrán sido los mayores consumidores de energía del subsector transporte de pasajeros con un total de 74% del total consumido equivalentes a 1.8 miles de millones GJ. Al año 2050 el consumo total habrá incrementado en un 92% comparado con el año inicial de proyección, ocupando el primer lugar de consumo los vehículos a gasolina con una participación del 73% del total para ese año. El resto de los valores pueden ser consultados en la Tabla 11.

Tabla 11. Proyección de consumo energético del parque vehicular de transporte de pasajeros. Miles de millones de Giga Joules.

Tipo/Año	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Gasolina</b>	1.4	1.0	1.1	1.8	2.9	4.8	7.9	13.0
<b>Diésel</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
<b>Eléctrico</b>	0.0	0.2	0.4	0.6	1.0	1.7	2.8	4.6
<b>Total</b>	1.4	1.2	1.5	2.4	3.9	6.5	10.7	17.7

El sector transporte de mercancía presenta una tendencia de reducción de su consumo energético, alcanzando su punto más bajo en el año 2031 con un total de 1.9 millones de GJ. Las proyecciones del modelo indican una disminución a más del doble del consumo desde el primer año proyectado hasta el final de la proyección. La Figura 30 muestra las variaciones de consumo del subsector de transporte de carga.

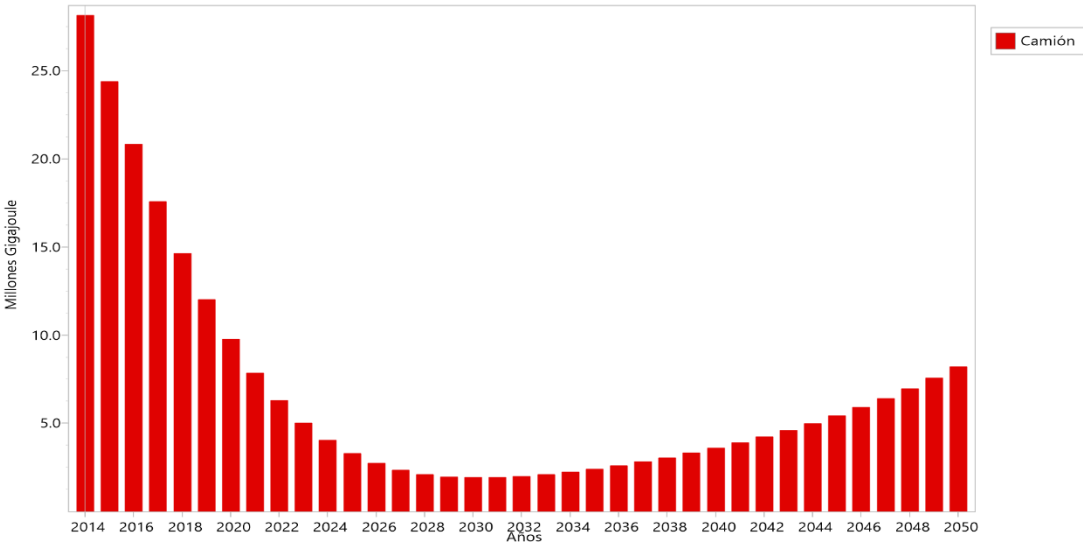


Figura 30. Variaciones del consumo energético del subsector transporte de carga.

### 5.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> del parque vehicular escenario BAU

La Figura 31 muestra el comportamiento de la cantidad de emisiones del parque vehicular proyectado por el escenario BAU. Para el año 2030 las emisiones alcanzan un total de 73.2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Para el año final del modelo se habrán alcanzado 541 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas por el sector autotransporte.

En la Tabla 12 pueden ser apreciados los resultados de las emisiones divididos en segmentos cada 5 años. El subsector de transporte de pasajeros presenta un incremento de emisiones a lo largo del tiempo, se alcanzaría un 37% de crecimiento para el año 2030 así como un 91% de aumento para el 2050. Para el subsector de transporte de carga se aprecia una disminución de más del doble para el año 2030 llegando a un incremento para el 2050.



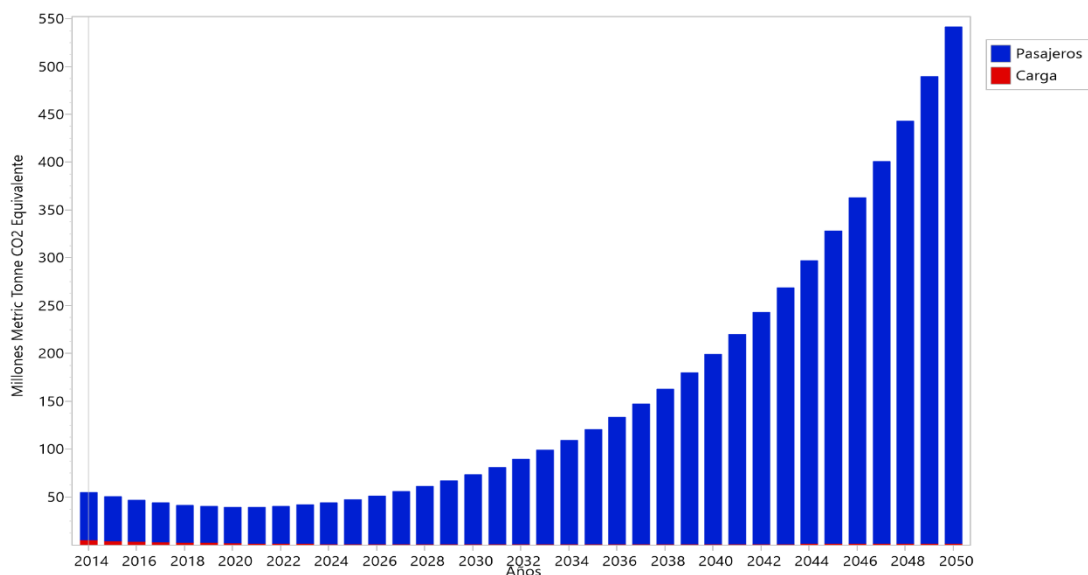


Figura 31. Resultados de las proyecciones de emisiones de CO<sub>2</sub> del parque vehicular de autotransporte en México.

Tabla 12. Total de emisiones de CO<sub>2</sub> por subsector de transporte de pasajeros y carga. millones de toneladas.

Tipo/Año	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Pasajeros</b>	46.3	37.6	46.7	73.2	120.2	198.3	327.2	540.0
<b>Carga</b>	4.0	1.6	0.5	0.3	0.4	0.6	0.9	1.3
<b>Total</b>	50.3	39.2	47.2	73.5	120.6	198.8	328.1	541.3

Para el año 2030 los vehículos a gasolina serán responsables por el 67% de las emisiones de CO<sub>2</sub> siendo el sector de mayor impacto con respecto a los vehículos de gasolina y eléctricos, Figura 32. Al año 2050 la participación del sector gasolina en las emisiones se habrá reducido a un 66.19%, mientras que tanto los vehículos eléctricos habrán mantenido su participación llegando a ocupar un 32% del total, Figura 33.

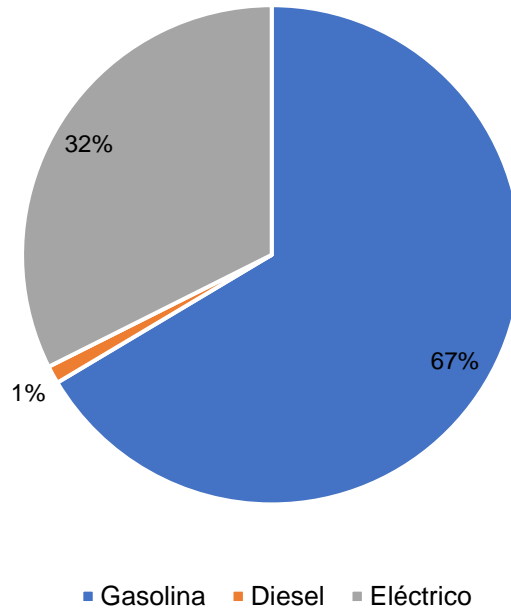


Figura 32. Porcentaje de participación por tipo de vehículo en las emisiones de CO<sub>2</sub> al 2030.

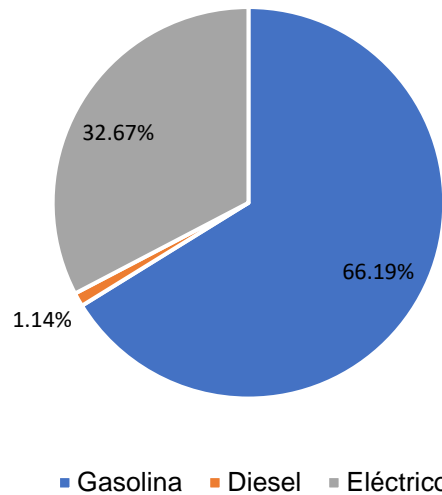


Figura 33. Porcentaje de Participación por tipo de vehículo en las emisiones de CO<sub>2</sub> al 2050.

Para el subsector de transporte de carga la Figura 34 muestra el comportamiento de decrecimiento en las emisiones de CO<sub>2</sub> iniciando con 3,954 de toneladas y culminando al año 2050 con un total de 1,331 de toneladas.

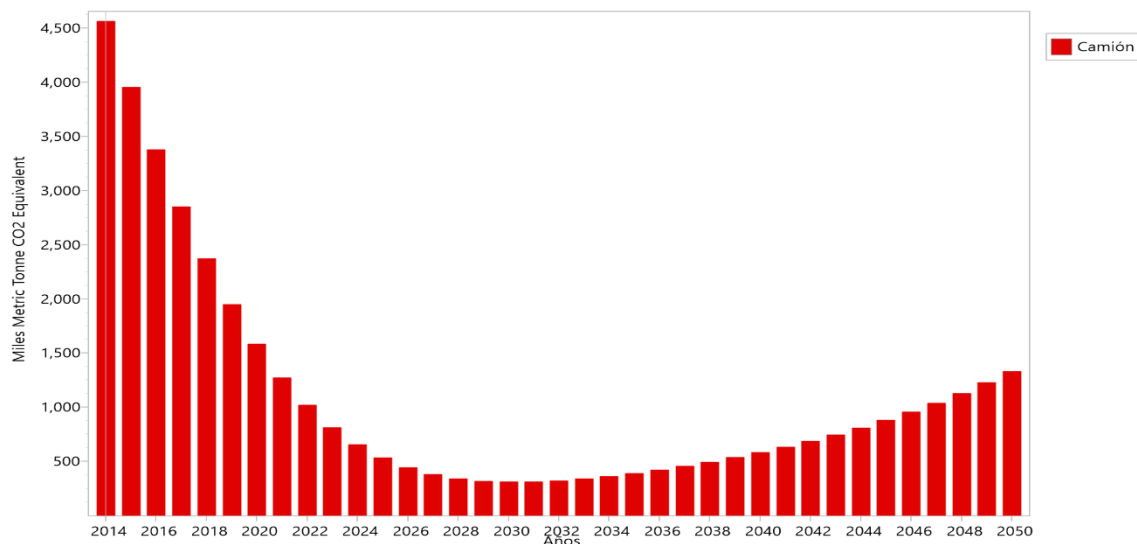


Figura 34. Variación en las emisiones de CO<sub>2</sub> del subsector transporte de carga.

#### 5.4. Comparativo de resultados del escenario base

##### 5.4.1 Comparativo de resultados del total del parque vehicular

Los resultados obtenidos del crecimiento vehicular del escenario BAU fueron comparados con los datos estadísticos recopilados por INEGI con respecto al total de vehículos en circulación registrados en México (Consulta interactiva de datos, 2014). La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos del escenario BAU junto con los datos estadísticos recabados por INEGI del año 2014 al 2019. Los valores obtenidos del modelo varían en un -22% con respecto a las cifras de INEGI en los años registrados.

Tabla 13 Resultados y comparativo del parque vehicular proyectado contra datos estadísticos de INEGI.

millones de unidades/ años	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>Datos INEGI</b>	38.03	39.98	42.45	45.85	47.82	50.59
<b>Resultados</b>	40.2	38.0	36.3	35.2	34.5	34.4
<b>Diferencia</b>	5%	-5%	-17%	-30%	-39%	-47%

#### 5.4.2 Comparativo de resultados de emisiones de CO<sub>2</sub>

Los resultados obtenidos del modelo fueron comparados con los datos reportados en el documento titulado Estrategia Nacional De Cambio Climático elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (ENCC) (Estrategia Nacional, 2013). La Figura 35 muestra la cantidad de emisiones estimadas por su modelo iniciando desde el año 2015, culminando en el 2050. La suma de emisiones de todos los rubros habrá alcanzado para el último año modelado un total de 2,500 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

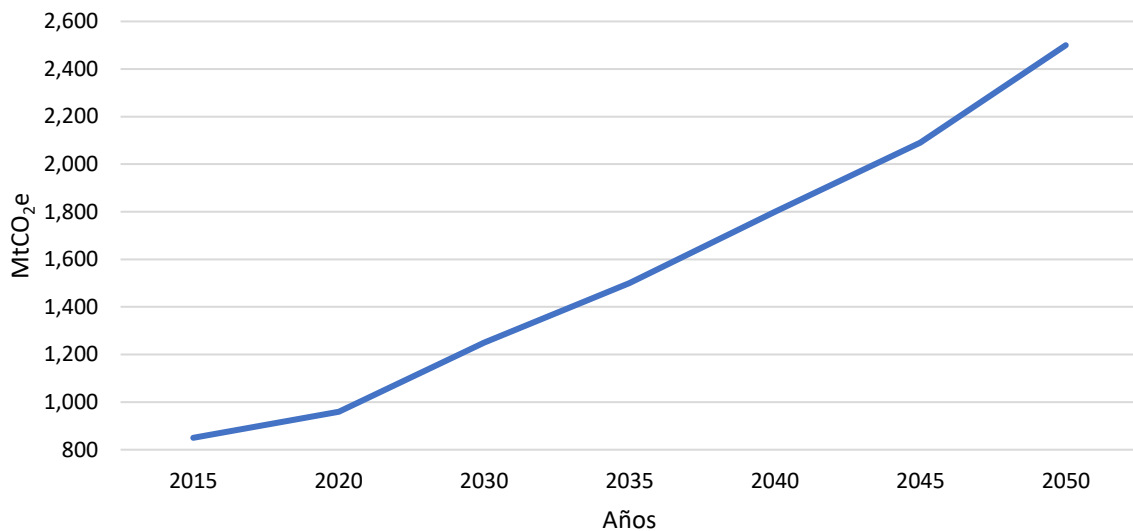


Figura 35. Emisiones de CO<sub>2</sub> proyectadas por el modelo de la Estrategia Nacional De Cambio Climático.

La Tabla 14 muestra los resultados agrupados en bloques de 5 años tanto del escenario BAU como también del modelo ENCC. Al comparar ambos resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> se aprecian diferencias entre ambos datos. Los resultados indican una variación conforme avanzan los años, llegando a culminar en 50% de diferencia entre ambos resultados para el año 2050.

Tabla 14. Comparativo de resultados del ENCC y escenario BAU.

	2015	2020	2030	2035	2040	2045	2050
LEAP (Mt CO <sub>2</sub> e)	50.3	39.2	47.2	73.5	120.6	198.8	328.1
ENCC (Mt CO <sub>2</sub> e)	221	249.6	325	390	468	543.4	650
Diferencia (%)	77%	84%	85%	81%	74%	63%	50%

### 5.5. Emisiones resultantes del bau y metas nacionales de reducción de CO<sub>2</sub> del sector transporte

México ha establecido objetivos de reducción de emisiones a nivel nacional, dichos objetivos han quedado pasmados en la Ley General De Cambio Climático (LGCC, 2012). Los objetivos de reducción de emisiones acordados son los siguientes:

- Reducir un 30% de las emisiones con respecto a la línea base al 2020.
- Alcanzar el 50% de las emisiones del año 2000 al 2050.

La Figura 36 expresa la tendencia de las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes del modelo realizado en comparación con la cantidad acordado de emisiones para los años 2030 y 2050. La meta reducción de emisiones para el 2050 es rebasada por las proyecciones del modelo en todos los años proyectados.

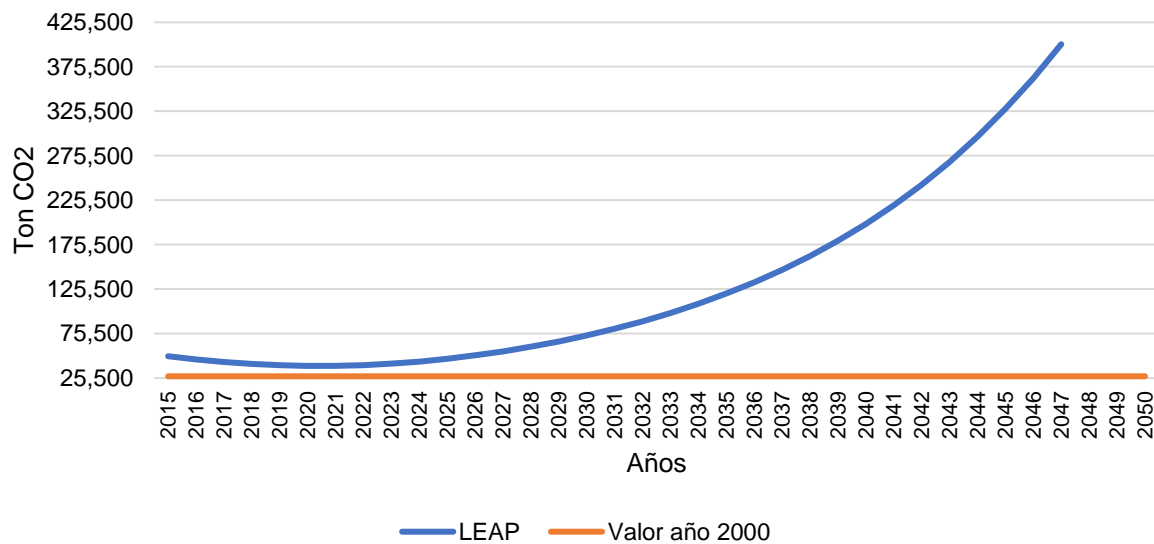


Figura 36. Comparativo de los objetivos de reducción para el año 2050 contra los resultados estimados por el modelo del sector transporte.

### 5.6 Resultados De Los Escenarios De Reducción De Emisiones

Los resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> de los escenarios de rendimiento mejorado, fomento de vehículos eléctricos y bioetanol E15 pueden ser apreciados en la Tabla 15.

Las emisiones obtenidas de los escenarios propuestos fueron evaluadas en comparación con los resultados del escenario BAU. Los porcentajes de diferencia

pueden ser apreciados en la Tabla 16. Los resultados muestran que a pesar las medidas implementadas no son lo suficientemente efectivas para lograr disminuciones importantes en la emisión de CO<sub>2</sub> en los años proyectados.

Tabla 15. Resultados de los escenarios de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Escenario	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Rendimiento Mejorado (Mt CO<sub>2</sub>)</b>	50.3	39.2	47.3	74.0	120.7	198.3	326.9	539.3
<b>Eléctricos (Mt CO<sub>2</sub>)</b>	50.3	39.1	47.0	72.7	118.8	195.2	320.7	527.0
<b>Bioetanol E15</b>	50.3	39.2	47.2	73.5	120.6	198.9	328.2	541.6

Tabla 16. Resultados porcentuales del comparativo de los escenarios de reducción de emisiones con respecto al escenario BAU.

Escenarios	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Bioetanol E15</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>Eléctricos</b>	0.0%	0.2%	0.6%	1.0%	1.4%	1.8%	2.2%	2.7%
<b>Rendimiento mejorado</b>	0.0%	0.0%	-0.2%	-0.7%	-0.2%	0.2%	0.4%	0.4%

Con respecto a las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> comparadas con el año base 2000, en ningún escenario los objetivos son cumplidos (Figura 37).

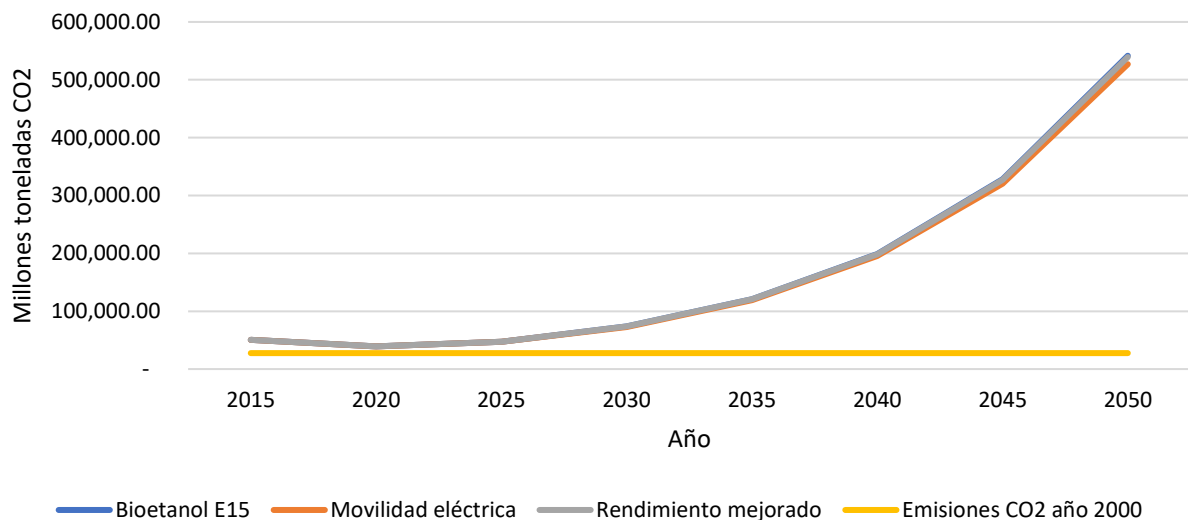


Figura 37. Resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> de los escenarios con respecto a la línea base de emisiones del año 2000.

## Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo de investigación aporta un modelo energético del sector autotransporte mexicano basado en diversos indicadores tales como crecimiento del parque vehicular, tendencias de rendimiento de los motores de combustión interna, kilómetros de mercancía transportado entre otras variables.

Los resultados obtenidos del modelo fueron comparados con dos parámetros registrados por instancias oficiales de estadística de datos. Los resultados del crecimiento del parque vehicular del modelo fueron contrastados con las cifras oficiales registradas por INEGI de los vehículos registrados en México iniciando en el año 2014, culminando al año 2019. Los resultados de variaciones en el crecimiento del parque vehicular presentan una diferenciación en promedio de -22% con respecto al crecimiento histórico del sector. Las diferencias entre los resultados generados y las cifras oficiales pueden ser ocasionadas debido a que solamente fueron utilizados datos históricos de autotransportes a gasolina, diésel y eléctricos, excluyendo otras tecnologías tales como autos a gas L.P., y natural entre otros.

Para el comparativo de las emisiones de CO<sub>2</sub> se evaluaron los valores obtenidos del modelo propuesto en este trabajo contra los resultados generado por el ENCC, resultando en discrepancias significativas entre ambas cifras, llegando a ser hasta un total del 85% de diferencia.

El modelo del sector autotransporte presentado en este trabajo resulta ser confiable para la obtención del crecimiento del parque vehicular, con respecto a las emisiones generadas por el modelo, se presentan variaciones comparadas con el modelo oficial de emisiones de CO<sub>2</sub>. A pesar de las variaciones con el modelo propuesto por la Secretaría de Medio Ambiente, elaborado como una herramienta útil para la generación de escenarios de prueba que sirvan para experimentar diferentes hipótesis en el ámbito del comportamiento energético del sector autotransporte.

Los valores obtenidos de los escenarios de bajas emisiones de CO<sub>2</sub> indican que las medidas planteadas no serán suficientes para conseguir los objetivos de reducción con respecto a la línea base del año 2000. El escenario de rendimiento mejorado

demostró aportar más reducciones en comparación con el escenario de vehículos eléctricos, sin embargo, contrastado con las emisiones del escenario BAU los resultados no superan el 10% de diferencia.

Para el año 2030 el modelo elaborado indica que el 58.3% del total de vehículos de pasajeros seguirá siendo de gasolina, mientras que el parque vehicular eléctrico abarcará un total de 41.5%. Lo anterior representa que el ritmo de crecimiento del parque vehicular resulta ser insuficiente para provocar un impacto en las disminuciones de CO<sub>2</sub> de dicho sector. Para el 2050 se sigue apreciando que más del 57.9% del parque vehicular de pasajeros será de gasolina, más del 40% será de eléctricos.

Con respecto a la drástica disminución de el rubro de camiones de carga, el efecto puede ser provocado por el desfase que existe entre la remoción de unidades que cumplen 22 años de existencia y el bajo crecimiento histórico en las ventas de dicho sector. Lo anterior, se expresa como un desajuste entre la salida de las unidades contra la entrada de nuevos camiones de carga.

El escenario de movilidad eléctrica pretende que al 2050 el 50% de los vehículos sean eléctricos con la intención de generar condiciones favorables para la reducción de emisiones derivadas de vehículos a gasolina. Sin embargo, los resultados de emisiones del escenario muestran que esta medida resulta ser insuficiente para evitar pasar la línea base de emisiones del año 2000. El parque vehicular eléctrico requiere de un mayor estímulo para incrementar su presencia en la matriz nacional de vehículos.

Los efectos ambientales de no considerar el ciclo de vida de los vehículos eléctricos en su totalidad deben ser tomados en cuenta. Los posibles beneficios relacionados con la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen en gran medida de la forma en como la energía eléctrica es generada.

En México más del 80% de la energía se produce por medio del uso de hidrocarburos. De no generar un cambio en la matriz energética del país todos los posibles ahorros de emisiones provenientes de la implementación de diferentes



políticas públicas enfocadas a la eficiencia energética resultarán inefectivas, puesto que las fuentes energéticas seguirán siendo contaminantes con el medio ambiente.

Los vehículos eléctricos podrían ser considerados una opción efectiva para reducir emisiones de CO<sub>2</sub>, sin embargo, la matriz energética no tendría que rebasar más de 21.1 Mt de CO<sub>2</sub> al año. Para generar menos emisión las fuentes energéticas tendrían que cambiar a opciones de generación tales como tecnología nuclear y fuentes renovables de energía. Fuentes geotérmicas, solares y eólicas podrían ser utilizadas para generar energía limpia para alimentar el sector vehicular.

El panorama actual del sector autotransporte en México no cumple con los requerimientos para ser considerado energéticamente sustentable. Las proyecciones a futuro del sector indican que, de seguir con la tendencia actual, los objetivos ambientales no serán cumplidos para el año 2050.

Para lograr las metas de reducción de emisiones de GEI, la descarbonización del sector energético mexicano junto con la implementación de nuevas tecnologías en el sector transporte, deben ser prioridades tanto para el Estado Mexicano como para el sector industrial y la sociedad civil.

## Referencias

Abdel-Aal, R.E. (2008). Univariate modeling and forecasting of monthly energy demand time series using abductive and neural networks. *Computers & Industrial Engineering*. 54. 903-917. 10.1016/j.cie.2007.10.020.

Acciones y Programas SEMARNAT. (2020). Programa Transporte Limpio. Recuperado 6 de agosto de 2020, de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales website: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programa-transporte-limpio-190236>

AIEa. (2020). Base de Datos Energética AIE. Recuperado 15 de mayo de 2020, de Base de Datos Agencia Internacional de Energía website: [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20\(TPES\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20(TPES)%20by%20source)

AIEb. (2020). Base de Datos Energética AIE. Recuperado 13 de mayo de 2020, de Base de Datos Agencia Internacional de Energía website: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Carbon%20intensity%20of%20industry%20energy%20consumption>

AIEc (2020). Base de Datos Energética AIE. International Energy Agency. Recuperado 7 de octubre de 2020, de Base de Datos Agencia Internacional de Energía website: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCShareBySector>

Alam, M., Kumar, K., Verma, S., & Dutta, V. (2020). Renewable sources based DC microgrid using hydrogen energy storage: Modelling and experimental analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100840.

Avendaño, W. (2011). Responsabilidad Social Corporativa (RSC) y Desarrollo Sostenible: una mirada desde la Declaración de Río de 1992. *Respuestas*, 16(2), 45-59.

Ayala, J. G. M. (2009). El desarrollo sustentable, el cambio climático global y el mundo urbano. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 11(2), 52-67.

Bailer-Jones, Daniela M., (2008). Standing Up Against Tradition Models and Theories in Nancy Cartwright's Philosophy of Science. *Nancy Cartwright's Philosophy of Science*, Nueva York / Londres, Routledge Studies in the Philosophy of Science, pp. 17-37.

Bauer, M., (1996). Transport and the environment: can technology provide the answers? *Energy Policy* 24, 685–687.

Bauer, M., Mar, E., & Elizalde, A. (2003). Transport and energy demand in Mexico: the personal income shock. *Energy Policy*, 31(14), 1475-1480.

Bhattacharyya, S. C., & Timilsina, G. R. (2009). Energy demand models for policy formulation: a comparative study of energy demand models. The World Bank.

BMa. (2020). Indicadores de Desarrollo Mundial. Recuperado 26 de abril de 2020, de Banco Mundial website: <https://databank.bancomundial.org/home.aspx>

BMb. (2020). Indicadores de Desarrollo Mundial. Recuperado 21 de abril de 2020, de Banco Mundial website: <https://databank.bancomundial.org/home.aspx>

BMc. (2020). Indicadores de Desarrollo Mundial. Recuperado 19 de abril de 2020, de Banco Mundial website: <https://databank.bancomundial.org/home.aspx>

Bockarjova, M., & Steg, L. (2014). Can Protection Motivation Theory predict proenvironmental behavior? Explaining the adoption of electric vehicles in the Netherlands. *Global Environmental Change*, 28, 276–288.

Bracco, S. (2015). Effectiveness of EU biofuels sustainability criteria in the context of land acquisitions in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 130-143.

Callejas, E. S., & Quezada, V. G. (2009). Los biocombustibles. *El cotidiano*, (157), 75-82.

Carpio, M. M. (2014). Energía, desarrollo, demografía y recursos naturales. *Dendra médica. Revista de humanidades*, 13(2), 182-196.

Castillo-Hernández, P., Mendoza-Domínguez, A., & Caballero-Mata, P. (2012). Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(3), 293-306.

Castellar Ortega, G. C., Angulo Mercado, E. R., & Cardozo Arrieta, B. M. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospectiva*, 12(2), 90-104.

Change, I. C. (2014). Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1454.

Consejo Nacional De Población, (2014). *La Situación Demográfica En México*. México, p.12.

Consulta interactiva de datos, (2014). Recuperado de: [Inegi.org.mx](https://www.inegi.org.mx). [https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=13158](https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=13158). Fecha de consulta: 25/05/2021.

Datos y Estadísticas Agencia Internacional de Energía. (2019). Base de Datos Energéticos AIE. Recuperado 14 de mayo de 2020, de [iea.org](https://www.iea.org) website: [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20\(TPES\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20(TPES)%20by%20source)

De la Rosa Ramos, L. R., Montero, E. H., Tuirán, E. S., & Delgado, K. A. O. (2015). Diseño y simulación de una planta para la producción de biodiésel a partir de *Jatropha Curcas L.* en el departamento de Bolívar. *Revista Ion*, 28(1), 73-85.

Fàbrega Ramos, M. (2009). Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna.

Fischer, G., Hizsnyik, E., Prieler, S., Shah, M., & van Velthuisen, H.T. (2009). Biofuels and Food Security. Final Report to Sponsor: The OPEC Fund for International Development (OFID), Vienna, Austria (March 2009).

Foro: Movilidad urbana sustentable en México. (2020). Recuperado 13 de septiembre de 2020, de Senado De La República website: [https://www.senado.gob.mx/comisiones/cambio\\_climatico/reu/docs/Movilidad-DiscurosyRelatoria.pdf](https://www.senado.gob.mx/comisiones/cambio_climatico/reu/docs/Movilidad-DiscurosyRelatoria.pdf)

Ganduglia, F., León, J. G., Gasparini, R., Rodríguez, M. E., Huarte, G. J., Estrada, J., & Filgueiras, E. (2009). Manual de biocombustibles. IICA, ARPEL.

Giansoldati, M., Danielis, R., Rotaris, L., & Scorrano, M. (2018). The role of driving range in consumers' purchasing decision for electric cars in Italy. *Energy*, 165, 267-274.

Global EV Outlook 2020 – Analysis - IEA. (2020). Global EV Outlook 2020 – Analysis - IEA. IEA. Recuperado 14 de abril 2020 de: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020#the-global-electric-vehicle-fleet-expanded-significantly-over-the-last-decade-underpinned-by-supportive-policies-and-technology-advances>

Gobierno De La República, (2015). Compromisos De Mitigación Y Adaptación Ante El Cambio Climático Para El Periodo 2020-2030 México. Fecha de consulta 02/07/2020. Recuperada de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162974/2015\\_indc\\_esp.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162974/2015_indc_esp.pdf)

González Merino, Arcelia, & Castañeda Zavala, Yolanda. (2010). Biocombustibles, biotecnología y alimentos: Impactos sociales para México. *Argumentos* (México, D.F.), 21(57), 55–83.

Gürsan, C., & de Gooyert, V. (2020). The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110552.

Heaps, C.G., (2016). Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. Fecha de consulta 20/05/2020. Recuperada de: <https://www.energycommunity.org>

Heaps, C. (2008). An introduction to LEAP. Stockholm Environment Institute, 1-16.

Hellgren, J. (2007). Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus powertrain for year 2005 and 2020. Energy policy, 35(1), 39-49.

Horta Nogueira, L. A. (2010). Indicadores de políticas públicas en materia de eficiencia energética en América Latina y el Caribe.

Howells, M., Rogner, H., Strachan, N., Heaps, C., Huntington, H., Kypreos, S., & Roehrl, A. (2011). OSeMOSYS: the open-source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development. Energy Policy, 39(10), 5850-5870.

INEGI. (2017). Vehículos de Motor Registrados en Circulación 2017. Recuperado 9 de octubre de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=privados>.

INEGIa. (2020). Base de Datos Estadística Sector Transporte. Recuperado 17 de marzo de 2020, de Sistema Municipal y Estatal de Base de Datos website: <https://sc.inegi.org.mx/cobdem/>

INEGIb. (2020). Base de Datos Estadística Vehículos Oficiales. Recuperado 17 de marzo de 2020, de Sistema Municipal y Estatal de Base de Datos website: <https://sc.inegi.org.mx/cobdem/>

INEGIc. (2020). Base de Datos Estadística Venta de Vehículos. Recuperado 17 de marzo de 2020, de Sistema Municipal y Estatal de Base de Datos website: <https://sc.inegi.org.mx/cobdem/>

INEGI d. (2020). Base de Datos Estadística Venta de Transportes de Carga. Recuperado 17 de marzo de 2020, de Sistema Municipal y Estatal de Base de Datos website: <https://sc.inegi.org.mx/cobdem/>

International Atomic Energy Agency, (2006). Model For Analysis Of Energy Demand (MAED-2). Vienna, Austria, p.3.

IPCC, R., & Revised, I. E. A. (2014). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, 10-1.

Isla, L., Singla, M., Porcel, M. R., & Granada, I. (2019). Análisis de tecnología, industria y mercado para vehículos eléctricos en América Latina y el Caribe. BID, 78.

Islas-Samperio, J. M., Manzini, F., & Grande-Acosta, G. K. (2020). Toward a Low-Carbon Transport Sector in Mexico. *Energies*, 13(1), 84.

Ivanchina, E., Chuzlov, V., Ivashkina, E., Nazarova, G., Tyumentsev, A., & Vymyatnin, E. (2020). Modeling of motor gasoline components complex production. *Catalysis Today*.

Jankilevich, S. (2012). Las cumbres mundiales sobre el ambiente Estocolmo, Río y Johannesburgo 30 años de Historia Ambiental.

Koç, Y., Yağlı, H., Goerguelue, A., & Koc, A. (2020). Analysing the performance, fuel cost and emission parameters of the 50 MW simple and recuperative gas turbine cycles using natural gas and hydrogen as fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 22138-22147.

Lafferty, W. M., & Eckerberg, K. (Eds.). (2013). From the Earth Summit to Local Agenda 21: working towards sustainable development. Routledge.

Ley General De Cambio Climático. 6 de junio 2012, última reforma publicada DOF 06-11-2020. Recuperado de:

[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC\\_061120.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_061120.pdf). Fecha de consulta: 5/5/2021. En texto (LGCC, 2012).

Li, H., Shan, W., Shen, S., Ren, Y., Zhang, D., Sun, R., & Ma, X. (2019). Production of a gasoline blending component with high-octane and low sulfur from coal tar light oil over sulfided CoMoP/η-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Cleaner Production*, 228, 965-973.

Loulou, R., Remne, U., Kanudia, A., Lehtila, A., Goldstein, G., (2005). Documentation for the TIMES Model - PART I 1–78.

Machado, C. (2010). Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. Organización Latinoamericana de Energía OLADE, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, 55-71.

Maciel, C. Á. (2016). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico.

Mateo, M. O. (2010). Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en vehículos de transporte: combustibles alternativos. *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, (8), 28-33.

Marelli, L., Padella, M., Edwards, R., Moro, A., Kousoulidou, M., Giuntoli, J., & Garcia-Lledo, L. (2015). The impact of biofuels on transport and the environment, and their connection with agricultural development in Europe.

Martínez Salgado, H. (2018). El desafío del sector transporte en el contexto del cumplimiento de las contribuciones determinadas a nivel nacional de América Latina.

Mead, I. (2017). International Energy Outlook 2017. US Energy Information Administration. Center for Strategic and International Studies September 14, 2017 | Washington, DC

Montico, S. (2016). Biocombustibles: cereales y oleaginosos para consumo o sustitución de energía fósil. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNR*, (12), 011-014.

Montilva, J., Arapé, N., & Colmenares, J. (2003, November). Desarrollo de software basado en componentes. In *Actas del IV. Congreso de Automatización y Control*. Mérida, Venezuela.

Mutizwa-Mangiza, N. D., Arimah, B. C., & Jensen, I. (2013). Cities and climate change: Global report on human settlements 2011.



Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 578-597.

NEGI. (2020). Recuperado 17 de marzo de 2020, de Sistema Municipal y Estatal de Base de Datos website: <https://sc.inegi.org.mx/cobdem/>

Ngang, E. A., & Abbe, C. V. N. (2018). Experimental and numerical analysis of the performance of a diesel engine retrofitted to use LPG as secondary fuel. *Applied Thermal Engineering*, 136, 462-474.

NOM-016-CRE-2016. (2016). Norma Oficial Mexicana 016, Comisión Reguladora de Energía. Especificaciones de calidad de los petrolíferos. Recuperado 4 de septiembre de 2021, de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016)

Objetivos de Desarrollo Sostenible. (s. f.). Agenda 2030 México. Recuperado 3 de abril de 2021, de <https://agenda2030.mx/#/home>

Olabe, A., González-Eguino, M., & Ribera, T. (2016). El Acuerdo de París y el fin de la era del carbón. *Real Instituto Elcano*.

Parque Vehicular. (2020). Recuperado 10 de octubre de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>.

Pinzón, C., Jaime, D., Corredor, R., Santamaría, P., Hernández, M., Johann, A., & Cesar, L. (2014). Implementación de indicadores energéticos en centros educativos. Caso de estudio: Edificio Alejandro Suárez Copete-Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Revista EAN*, (77), 186-200.

Prospectiva de Gas L.P. 2018-2019. (2020). Secretaría de Energía. Recuperado 18 de noviembre de 2020, de SENER website: <https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico>

Prospectiva del Crudo y Petrolíferos 2018-2032. (2019). Secretaría de Energía. Recuperado 18 de noviembre de 2020, de SENER website: [https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP\\_2018\\_2032\\_F.pdf](https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP_2018_2032_F.pdf)

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2018). Propuesta de Instrumentos para facilitar medidas de eficiencia energética en el sector instrual de México. Recuperado en 6 de julio de 2021, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/400188/HojaRuta\\_EE\\_DIGITAL\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/400188/HojaRuta_EE_DIGITAL_.pdf).

Quijano Hurtado, R., & Domínguez Bravo, J. (2008). Diseño de un proyecto integrado para la planificación energética y el desarrollo regional de las energías renovables en Colombia basado en sistemas de información geográfica. Hernández, L. y Parreño, JM (Eds.).

Rolleri, José Luis. (2013). ¿Qué son los modelos físicos?. Valenciana, 6(11), 271-288. Recuperado en 14 de mayo de 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-25382013000100007&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-25382013000100007&lng=es&tlng=es).

Sánchez Rico, A. P. (2019). Vigilancia tecnológica y prospectiva tecnológica, disciplinas que generan insumos para el diseño de políticas de ciencia, tecnología e innovación.

Sandoval García, E. R., Franco González, R. L. P. E., & Fernández Morales, J. M. (2019). Vehículos eléctricos: ¿Una solución para reducir los gases de efecto invernadero proveniente del sector transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México?. Acta universitaria, 29.

Schulz, H. (1999). Short history and present trends of Fischer–Tropsch synthesis. Applied Catalysis A: General, 186(1-2), 3-12.

Scorrano, M., Danielis, R., & Giansoldati, M. (2020). Dissecting the total cost of ownership of fully electric cars in Italy: The impact of annual distance travelled, home charging and urban driving. Research in Transportation Economics, 100799.

Secretaría De Energía a, (2019). Balance Nacional De Energía 2018. Ciudad De México, p.20.

Secretaría De Energía b, (2019). Balance Nacional De Energía 2018. Ciudad De México, p.36.

Secretaría De Energía c, (2019). Balance Nacional De Energía 2018. Ciudad De México, p.36.

Secretaría De Energía d, (2018). Balance Nacional De Energía 2018. Ciudad De México, p.38.

Secretaría De Energía e, (2018). Balance Nacional De Energía 2018. Ciudad De México, p.38.

Secretaría De Energía, (2020). PRODESEN 2019-2033. Ciudad De México, p.35.

Seebregts AJ, Goldstein GA, Smekens K - Energy/Environmental Modeling with the MARKAL Family of Models, Operations Research Proceedings 2001,

Segovia, F. C., Molina, F. E., & Campoverde, N. R. (2010). Gas licuado de petróleo como combustible alternativo para motores diesel con la finalidad de reducir la contaminación del aire. Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, (4), 73-81.

SENER-SIEa. (2020). Sistema Información Energética. Recuperado 6 de mayo de 2020, de: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true>

SENER-SIEb. (2020). Sistema Información Energética. Recuperado 8 de mayo de 2020, de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true> website:

SENER-SIEc. (2020). Sistema Información Energética. Recuperado 3 de mayo de 2020, de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true> website:

SENER-SIEd. (2020). Sistema Información Energética. Recuperado 1 de mayo de 2020, de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true> website:

SENER-SIEe. (2020). Sistema Información Energética Recuperado 7 de mayo de 2020, de website: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true>

SENER-SIEf. (2020). Sistema Información Energética. Recuperado 7 de mayo de 2020, de website: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true>

Serna, F., Barrera, L., & Montiel, H. (2011). Impacto social y económico en el uso de biocombustibles. *Journal of technology management & innovation*, 6(1), 100-114.

Solís Ávila, J. C., & Sheinbaum Pardo, C. (2016). Consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> del autotransporte en México y escenarios de mitigación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(1), 7-23.

Suganthi, L., & Samuel, A. A. (2016). Modelling and forecasting energy consumption in INDIA: Influence of socioeconomic variables. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 11(5), 404-411.

Synák, F., Čulík, K., Rievaj, V., & Gaňa, J. (2019). Liquefied petroleum gas as an alternative fuel. *Transportation Research Procedia*, 40, 527-534.

Tsang, M., C. Fox-Lent, S. Wallace, T. Welp, M. Bates and I. Linkov. (2015). Life-cycle impacts of soybean and algae biodiesel: Case study of US marine vessels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(5): 567-580.

USDA Foreign Agricultural Services. (2017). Brazil Biofuels Annual 2017. Recuperado de [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual\\_Sao%20Paulo%20ATO\\_Brazil\\_9-15-2017.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_9-15-2017.pdf)

Van der Hoeven, M. (2015). Indicadores de eficiencia energética: Bases esenciales para el establecimiento de políticas. International Energy Agency (IEA), Tech. Rep.

www.Fueleconomy.gov. (2020). Compare Old and New Fuel Economy Estimates. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Recuperado 25 de septiembre de 2020, de <https://www.fueleconomy.gov/feg/compareMPG.shtml#id=34785>

Yasar, N. (2017). The relationship between energy consumption and economic growth: Evidence from different income country groups. *International journal of energy economics and policy*, 7(2), 86-97.

Zonooz, M. R. F., Nopiah, Z. M., Yusof, A. M., & Sopian, K. (2009). A review of MARKAL energy modeling. *European Journal of Scientific Research*, 26(3), 352-361.