

## Vehículos eléctricos: ¿Una solución para reducir los gases de efecto invernadero proveniente del sector transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México?

Electric vehicles: A solution to reduce greenhouse gases from the transport sector in the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico?

Edgar Roberto Sandoval García<sup>1\*</sup>, Rosa Laura Patricia Edith Franco González<sup>1</sup>, Juan Manuel Fernández Morales<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli, Av. Nopaltepec S/N,  
Col. Fracción La Coyotera del Ejido de San Antonio Cuamatla, 54748 Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

Correo electrónico: rsandovg75@gmail.com

\*Autor de correspondencia

### Resumen

En México, aproximadamente el 77.8% de la población ya vive en localidades urbanas, situación que ha generado diversas problemáticas complejas tales como el congestionamiento de tránsito, contaminación del aire, seguridad energética y los efectos del calentamiento global. A nivel internacional, México ha adquirido el compromiso de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes del sector transporte en un 21% para el año 2030. El propósito de este estudio es estimar la eficacia de diferentes tipos de vehículos eléctricos (VE) para reducir los GEI provenientes del sector transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), para lo cual se comparan, mediante un análisis algebraico, diferentes fuentes de generación de electricidad. Esto da como resultado que las fuentes renovables de energía, las cuales suministrarían a los VE, generarían menos emisiones de GEI de forma anual por su bajo nivel de intensidad de carbono equivalente, comparados con vehículos de combustión interna.

**Palabras clave:** Energía renovable; vehículos eléctricos; emisiones de carbono equivalente; costos nivelados de generación.

### Abstract

In Mexico, approximately 77.8% of the population already lives in urban areas, a situation that has generated several complex problems such as traffic congestion, air pollution, energy security and the effects of global warming. At an international level, Mexico has made a commitment to reduce its greenhouse gas (GHG) emissions coming from the transportation sector by 21% for 2030. The purpose of this study is to estimate the effectiveness of different types of electric vehicles (EV) to reduce the GHG from the transport sector in the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico (MZVM), for which different sources of electricity generation are compared by means of an algebraic analysis. As a result, renewable energy sources, which would supply the EV, would generate less GHG emissions annually due to their low level of equivalent carbon intensity, compared to internal combustion vehicles.

**Keywords:** Renewable energy; electric vehicles; carbon equivalent emissions; leveled costs of energy.

---

Recibido: 8 de junio de 2017

Aceptado: 20 de septiembre de 2018

Publicado: 29 de mayo de 2019

---

**Como citar:** 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, e1964. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.1964>

## Introducción

Se estima que, para el año 2050, el 70% de la población mundial habitará en zonas urbanas. En México, desde el 2010, el 77.8% de la población ya habita en localidades urbanas, lo que ha generado diferentes problemáticas complejas y ampliamente vinculadas como: congestionamiento de tránsito, contaminación del aire, seguridad energética, efectos del calentamiento global, sobre población, incremento de servicios básicos, centralización, entre otros (Consejo Coordinador Empresarial [CCE], 2015).

Lo anterior alineado al compromiso que adquiere México de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes del sector transporte en un 21% sobre la línea base, al reducir de 229 Mt CO<sub>2</sub>e a 181 Mt CO<sub>2</sub>e al año 2030 respecto a las 148 Mt CO<sub>2</sub>e emitidas en 2013; este compromiso lo hizo ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2015).

En específico, para la problemática de la contaminación medioambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), los vehículos automotores han sido una de las principales causas de contaminación, al quemar diariamente 4.5 millones de litros de diésel, 18 millones de litros de gasolina y 700 000 litros de gas licuado de petróleo. El 52% de los vehículos a gasolina son modelos anteriores a 1990, que generan el 68% de las emisiones contaminantes<sup>1</sup> debido a la combustión de gasolina; principalmente, al no contar con la tecnología apropiada de mitigación de emisiones, el convertidor catalítico (Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal [Fimevic], 2014).

Así mismo, el gran incremento poblacional en las áreas urbanas del país ha provocado cambios importantes en los patrones de movilidad, por ejemplo: el incremento de los viajes metropolitanos entre las zonas conurbadas y la Ciudad de México, los cuales transitaron durante los últimos años del 17% al 22% del total de viajes que se realizan, además de que el 33% de estos se llevan a cabo entre las 6:00 h y las 9:00 h, provocando una gran saturación de vialidades y una velocidad promedio de 15 km/hr, sin considerar que en horarios de máxima demanda (HMD) la velocidad disminuye hasta en 6 km/hr (Fimevic, 2014).

En este sentido, a nivel mundial han surgido diferentes estrategias de mitigación de emisiones de GEI en el transporte, las cuales tienen como foco principal lo relacionado a evitar viajes, cambiar a modalidades más sostenibles y mejorar la eficiencia de estos. Entre las estrategias más representativas se pueden mencionar: a) Un transporte público atractivo, seguro y confiable; b) Atención a los espacios para impulsar el transporte no motorizado; c) Eliminación de subsidios; d) Gestión del estacionamiento; e) Capacidad de las vialidades; f) Carga multimodal y g) Eficiencia energética vehicular y cambio de combustible, por ejemplo, a vehículos eléctricos (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2013).

Con lo anterior bajo premisa, resulta necesario tener una visión sobre la efectividad de los diferentes tipos de vehículos eléctricos para lograr la reducción de emisiones de GEI provenientes del sector transporte en un 21%. Por lo que en este estudio se comparan diferentes tecnologías de generación eléctrica, capaces de suministrar la energía requerida para el funcionamiento de vehículos eléctricos de tipo particular, transporte masivo y para transporte de carga; tomando en cuenta las emisiones de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) generadas considerando el ciclo de vida de la tecnología, respecto a las emisiones a ser

<sup>1</sup> Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y productos de una combustión incompleta como el monóxido de carbono (CO); los hidrocarburos que escaparon al proceso de combustión y los óxidos de nitrógeno que se forman con el oxígeno y el nitrógeno del aire a elevadas temperaturas dentro de la cámara de combustión del motor.

generadas por vehículos convencionales a combustión interna, incluyendo como criterio alterno de toma de decisión el costo nivelado de generación<sup>2</sup> (LCOE, por sus siglas en inglés) de cada tecnología evaluada.

## Materiales y Métodos

Con la finalidad de obtener datos cuantitativos que permitan definir en qué medida los vehículos eléctricos (VE) podrían reducir las emisiones de GEI respecto a vehículos convencionales, este estudio compara, mediante un análisis algebraico, la generación de emisiones de carbono equivalente procedentes de la generación de electricidad a ser consumida por VE de tipo particular, transporte masivo y transporte de carga, respecto a vehículos a combustión interna.

De manera inicial, se calcula la demanda eléctrica para tres diferentes casos con características específicas de vehículo y distancia recorrida, tomando en cuenta el nivel actual de pérdidas por transmisión y distribución; posteriormente, se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub>e por tipo de tecnología de generación, considerando el factor de intensidad de carbono equivalente. Para comparar las emisiones de CO<sub>2</sub>e en cada caso, en una segunda etapa se calculan las emisiones directas provenientes del uso de vehículos a combustión interna al recorrer la misma distancia antes mencionada. A continuación, se hace una descripción detallada de cada caso planteado.

Caso 1, análisis de vehículos eléctricos particulares (VEP). En esta primera sección del estudio se considera al corredor vial, formado por el Anillo Periférico de la Ciudad de México y la autopista México-Querétaro en un tramo de 31.2 km, como una muestra representativa de las condiciones de vialidad urbana de la ZMVM y por el cual se prevé transiten en promedio 5100 vehículos diarios durante las HMD (Fimevic, 2014).

Para determinar la demanda energética de cada vehículo eléctrico bajo condiciones de tráfico urbano, se utilizó la ecuación propuesta por Enjian, Zhiqiang, Yuanyuan & Ting (2013) para vehículos ligeros (menos de 4.5 toneladas), que determina un Factor de Consumo Eléctrico (FCE) tomando en cuenta el tipo de vialidad (autopista urbana, vía principal, camino secundario o rama) y la velocidad promedio del usuario. En este estudio se consideró la ecuación propuesta para vialidades de carácter principal:

$$FCE = -0.179 + 0.004V + 5.492/V \quad (1)$$

donde:

- FCE = factor de consumo eléctrico (kWh/km)
- V= velocidad promedio (km/h)

Tomando en cuenta que la velocidad promedio en HMD es de 6 km/h, con base en la Ecuación 1, se estima un FCE = 0.76 kWh/km. Aplicando este valor y considerando una distancia de 31.2 km entre el municipio de Cuautitlán Izcalli en el Estado de México y la zona de Paseo de la Reforma en la Ciudad de México, se obtiene una demanda eléctrica de 47.4 kWh/día (por la operación de 0.76 kWh/km\*31.2 km\*2) por cada VE para un viaje de ida y de regreso o 17 301 kWh/VE de forma anual.

<sup>2</sup> Valoración económica del costo del sistema de generación de energía que incluye todos los costos a lo largo de su vida útil: la inversión inicial, la operación y mantenimiento, el costo de combustible, el costo de capital y el cálculo de los costos de la generación de diferentes fuentes.

Ante un escenario a mediano plazo, año 2030, en el que los 5100 vehículos que transitan actualmente dicha ruta fueran VE, la demanda energética anual alcanzaría un valor de 88 235.1 MWh (por la operación de 17 301 kWh/VE\*5100 VE\*1 MWh/1000 kWh). Esta demanda eléctrica tendría que ajustarse mediante un factor porcentual referente a pérdidas por trasmisión de aproximadamente 4.8% (*Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEEEx]*, 2017) y por distribución, que para el Valle de México es del orden del 25% del total de la energía recibida (Secretaría de Energía [Sener], 2015b). Así se estima que la demanda eléctrica ajustada tendría que ser del orden de 115 587.9 MWh/año (por la operación de 88 235.1 MWh\*1.048\*1.25).

Para calcular las emisiones de carbono equivalente, por tipo de tecnología de generación, se utilizó el factor de intensidad de carbono equivalente (ICe, t CO<sub>2</sub>e/MWh) (Santoyo-Castelazo, Gujba & Azapagic, 2011; *Parliamentary Office of Science and Technology [UK-POST]*, 2011), el cual indica el nivel de emisiones de carbono equivalente por cada mega watt hora generado y por tipo de tecnología durante su ciclo de vida. De esta forma se calcularon las toneladas de carbono equivalente a generarse con base en la demanda eléctrica previamente estimada (tabla 1).

Así mismo, en la tabla 1 se muestran los valores de LCOE (Sandoval-García, 2016), los cuales permiten realizar una comparación entre los costos de generación eléctrica de diversas tecnologías utilizadas para estimar la inversión necesaria dependiendo de la tecnología evaluada.

**Tabla 1.** Emisiones de carbono equivalente y costo nivelado de generación al producir 115 587.9 MWh/año, por tipo de tecnología (valores para el Escenario al 2030 y bajo una demanda eléctrica ajustada).

Tipo de tecnología	ICe (t CO <sub>2</sub> e/MWh)	M CO <sub>2</sub> e/año	LCOE, 2030 (dólares/MWh)	Costo de generación (millones de dólares)
Biomasa Residual	0.55	63.6	53.6	\$6.2
Ciclo combinado a gas (CCG)	0.41	47.8	63.7	\$7.36
Carboeléctrica supercrítica con desulfuración (CSD)	0.992	114.7	198	\$22.9
Nuclear	0.011	1.3	403.2	\$46.6
Geotérmica	0.13	15.3	43.2	\$4.96
Mini-Hidroeléctrica	0.004	0.46	529.7	\$61.2
Eólica, clase viento 6	0.02	2.3	38.3	\$4.4
Solar fotovoltaica	0.116	13.4	62.2	\$7.2

Fuente: Elaboración propia en base a Santoyo *et al.* (2011), UK-POST (2011) y Sandoval-García (2016).

Respecto a las emisiones de carbono equivalente a ser generadas, considerando el Escenario al 2030 *bajo condiciones actuales*; es decir, continuar con la tecnología de propulsión basada en combustión interna, se estima que las emisiones que producirían 5100 autos a gasolina, tomando en cuenta un factor de 0.23 kgCO<sub>2</sub>e/km (New Zealand Ministry for the Environment [NZMFE], 2015) como constante al año 2030, generarían un total de emisiones del orden de 26.72 Mt de CO<sub>2</sub>e/año (por la operación de 5100\*0.23 kgCO<sub>2</sub>e/km\*62.4 km\*365\*1Mt/1 000 000 kg).

Caso 2, análisis de Autobuses Eléctricos Renovados (AER) para el transporte urbano, una proyección al 2030. En esta sección del estudio, se considera la ruta entre el municipio de Ecatepec en el Estado de México, la segunda zona urbana más habitada del país, y la Ciudad de México, con una distancia de 26 km, como una muestra representativa de las condiciones de vialidad urbana de la ZMVM.

Respecto al número de unidades a evaluar, se consideraron 20 000 unidades de transporte de pasajeros que, de acuerdo con las autoridades de la capital del país y del Estado de México, requieren ser renovadas a la brevedad debido a que cuentan en la actualidad con una antigüedad de entre 20 y 30 años (Villavicencio, 2016).

Para determinar la demanda energética de cada vehículo eléctrico bajo condiciones de tráfico urbano, se consideró el rendimiento promedio de 1.5 kWh/km, dato que proporcionó la empresa jalisciense *Advanced Power Vehicles* (APV) mediante solicitud a través de su página web<sup>3</sup>. Esta empresa, que cuenta con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) mediante el Programa de Estímulos a la Innovación, propone la conversión de vehículos usados con motores a diésel a motores eléctricos, ofreciendo ahorros en costos de operación de entre 70% y 80%, basado en ahorro de combustible y costos de mantenimiento, y un tiempo de recuperación de la inversión de cuatro años aproximadamente (Muñoz, 2016).

Derivado de lo anterior, y basado en la experiencia de los transportistas, el número de viajes (ida y vuelta) por día se considera igual a cuatro que, al realizarse durante 48 semanas efectivas de cinco días (240 días/año), se puede estimar una demanda eléctrica de: 6.24 GWh/día (por la operación de 26 km\*2\*20 000\*4 viajes\*1.5 kWh/km\*1 GWh/1 000 000 kWh) o 1.5 TWh/año (por la operación de 6.24 GWh/día\*240 día/año\*1 TWh/1000 GWh) para el suministro de las 20 000 unidades. Esta demanda eléctrica tendría que ajustarse, de manera similar al Caso 1, mediante un factor porcentual referente a pérdidas por trasmisión y distribución. Así, la demanda eléctrica ajustada sería de 1.97 TWh/año (por la operación de 1.5 TWh\*1.048\*1.25).

Para calcular las emisiones de carbono equivalente, por tipo de tecnología, se utilizaron los mismos factores de intensidad de carbono equivalente mencionados en el primer caso. Así se calcularon las toneladas de emisiones a generarse con base en la demanda eléctrica previamente estimada (tabla 2).

**Tabla 2.** Emisiones de carbono equivalente y costo nivelado de generación al producir 1.97 TWh/año, por tipo de tecnología (valores para el Escenario al 2030 y bajo una demanda eléctrica ajustada).

Tecnología	ICe (t CO <sub>2</sub> e/MWh)	Mt CO <sub>2</sub> e/año	LCOE, 2030 (dólares/MWh)	Costo de generación (mdd)
Biomasa Res.	0.55	1.09	53.6	\$105.8
CCG	0.41	0.81	63.7	\$125.7
CSD	0.992	1.96	198	\$391
Nuclear	0.011	0.02	403.2	\$796
Geotérmica	0.13	0.26	43.2	\$85.3
Mini-Hidroeléctrica	0.004	0.01	529.7	\$1045.6
Eólica, clase viento 6	0.02	0.041	38.3	\$75.5
Solar fotovoltaica	0.116	0.23	62.2	\$122.7

Fuente: Elaboración propia en base a Santoyo *et al.* (2011), UK-POST (2011) y Sandoval-García (2016).

Respecto a las emisiones de GEI a ser generadas, considerando un escenario sin cambio tecnológico al utilizar unidades de transporte a combustión interna bajo un suministro confiable de diésel Ultra Bajo

<sup>3</sup> Valoración económica del costo del sistema de generación de energía que incluye todos los costos a lo largo de su vida útil: la inversión inicial, la operación y mantenimiento, el costo de combustible, el costo de capital y el cálculo de los costos de la generación de diferentes fuentes.

Azufre (UBA) al año 2030, se estimaron las emisiones que producirían 20 000 vehículos interurbanos nuevos.

Para el cálculo de las emisiones se consideraron vehículos con una eficiencia de 3.08 km/L (Johnson, Alatorre, Romo, Liu & 2009), un poder calorífico del diésel UBA de 10.5 kcal/kg y densidad de 0.84 kg/L (Energex, 2015), y un factor de emisiones de GEI del diésel UBA de 92 gCO<sub>2</sub>e/MJ (*The Natural Resources Defense Council [NRDC]*, 2010), considerando el ciclo de vida total del combustible, obteniéndose un total de 1.1 Mt de CO<sub>2</sub>e/año.

Caso 3, análisis de vehículos híbridos eléctrico/diésel para el sector autotransporte de carga al año 2030. Para esta sección del estudio, se considera la tecnológica en fase de prueba E-Highway<sup>4</sup> de la compañía alemana Siemens, la cual propone un vehículo híbrido (VH) con motor a diésel para trayectos cortos y maniobras, un motor eléctrico para ser utilizado durante largos trayectos, lo cual requeriría de la electrificación de las principales autopistas del país<sup>5</sup>, evitando así el problema de autonomía de los sistemas de propulsión eléctrica a baterías, en donde los resultados obtenidos ofrecen rendimientos promedio<sup>6</sup> de 1.45 kWh/km, para tractocamiones de 40 t transportando 28 t de carga.

Referente a la distancia a evaluar, se seleccionó la ruta de transporte de carga Ciudad de México–Nuevo Laredo, Tamaulipas con una distancia<sup>7</sup> de 1116.3 km, dado que el paso fronterizo de Nuevo Laredo está considerado como el más importante, no sólo de México sino de América Latina (El Universal, 2015).

En cuanto al número de unidades de autotransporte de carga a ser sometidas al proceso de simulación, se prevé que al menos el 10% de los 251 456 tracto camiones a diésel con 15.1 años de vida promedio (Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2015) que circularon en el país durante el 2014 puedan ser reemplazados por unidades híbridas.

Dadas las anteriores condiciones de distancia y de rendimiento promedio, se estima una demanda eléctrica por vehículo de 1618.6 kWh (por la operación de 1116.3 km\*1.45 kWh/km) por viaje sencillo. Tomando en cuenta 25 146 unidades a ser reemplazadas, 1 viaje/semana, 52 semanas/año, se requeriría satisfacer una demanda eléctrica de 4.23 TWh (por la operación de 1618.6 kWh\*2\*52\*25 146\*TWh/1 000 000 000 kWh) de forma anual.

Esta demanda eléctrica se ajusta por el nivel de pérdidas técnicas y no técnicas del Sistema Nacional de Transmisión y Distribución de aproximadamente 17% (Sener, 2015a) y se obtienen valores de 5.19 TWh/flota (por la operación de 4.23 TWh\*1.048\*1.17) al año. Posteriormente se estiman las emisiones de carbono equivalente (tabla 3).

**Tabla 3.** Emisiones de carbono equivalente al producir 5.19 TWh/año, por tipo de tecnología (valores para el Escenario al 2030 y bajo una demanda eléctrica ajustada).

Tecnología	ICe (t CO <sub>2</sub> e/MWh)	Mt CO <sub>2</sub> e/flota	LCOE, 2030 (dólares/MWh)	Costo de generación (mdd)
Biomasa Res.	0.55	2.9	53.6	\$39.1

<sup>4</sup> Bajo el concepto de electrificar las principales autopistas del país, la tecnología contiene tres elementos principales: fuente de electricidad, pantógrafo y tecnología de propulsión.

<sup>5</sup> Bajo el concepto de electrificar las principales autopistas del país, la tecnología contiene tres elementos principales: fuente de electricidad, pantógrafo y tecnología de propulsión.

<sup>6</sup> Datos compartidos por Benjamin Wickert (*Business Development of the eHighway department at Siemens Mobility*), a solicitud de información durante el mes de abril de 2017 por medio de correo electrónico.

<sup>7</sup> Dato obtenido del sitio web <https://distancia.mx/Ciudad-de-Mexico/Nuevo-Laredo>.

CCG	0.41	2.1	63.7	\$46.3
CSD	0.992	5.2	198	\$143.3
Nuclear	0.011	0.058	403.2	\$290.9
Geotérmica	0.13	0.675	43.2	\$31.2
Mini-	0.004	0.021	529.7	
Hidroeléctrica				\$383.6
Eólica, clase viento 6	0.02	0.104	38.3	\$27.5
Solar fotovoltaica	0.116	0.61	62.2	\$44.9

Fuente: Elaboración propia en base a Santoyo *et al.* (2011), UK-POST (2011) y Sandoval-García (2016).

En cuanto a las emisiones provenientes de vehículos de carga utilizando tecnologías de propulsión convencional, esta propuesta estima las posibles emisiones de CO<sub>2</sub>e a ser generadas por vehículos con sistemas de propulsión a diésel y gas natural licuado (GNL), con base en los valores de emisiones de carbono equivalente durante el ciclo de vida de un tractocamión por tipo de combustible (tabla 4).

Cabe mencionar que cuando se usa el gas natural como combustible para vehículos, este puede ofrecer beneficios al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante el ciclo de vida sobre los combustibles convencionales, según el tipo de vehículo, el ciclo de conducción y la calibración del motor (*Office of Energy Efficiency & Renewable Energy [EERE]*, 2017a). Además de que resultados experimentales muestran que el funcionamiento con combustible dual (diésel como combustible de ignición y gas natural) puede lograr una mayor eficiencia térmica en todas las condiciones de operación, así como una disminución en los niveles de emisión de gases contaminantes como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno (NOx) y el dióxido de carbono (Wong, 2005).

**Tabla 4.** Emisiones de carbono equivalente durante el ciclo de vida de un tractocamión, por tipo de combustible (gCO<sub>2</sub>e/galón de diésel equivalente).

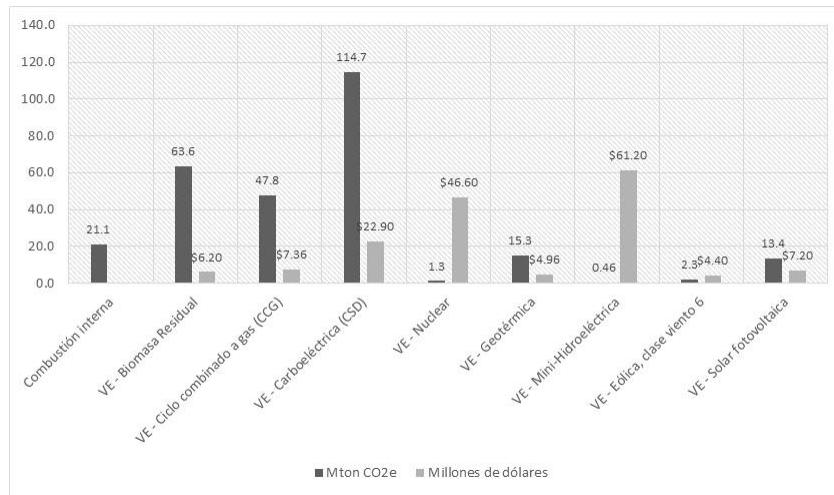
Combustible	Extracción	Proceso	Transporte y almacenamiento	Emisiones durante su uso	Ciclo de vida total
LNG	447	1397	259	7954	10 057
Diésel	888	1480	336	9966	12 669

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de la CEC (2009). Tecnología LNG-Kenworth, disponible en <http://www.energy.ca.gov>.

Así, al considerar un semitrailer de 42 t máx. a media carga con un rendimiento de 0.3 L/km (VTT, 2005) se obtiene que el reemplazar 25 146 a nuevas unidades a diésel o GNL se estarían emitiendo: 2.93 Mt CO<sub>2</sub>e (por la operación de  $25\ 146 \times 0.3\text{ L/km} \times 1116.3\text{ km} \times 2 \times 52 \times 12\ 669\text{ gCO}_2\text{e/galón} \times 1\text{ galón} / 3.78541\text{ L} \times 1\text{ t} / 1\ 000\ 000\text{ g} \times 1\text{ Mt} / 1\ 000\ 000\text{ ton}$ ) y 2.33 Mt CO<sub>2</sub>e/flota (por la operación de  $25\ 146 \times 0.3\text{ L/km} \times 1116.3\text{ km} \times 2 \times 52 \times 10\ 057\text{ gCO}_2\text{e/galón} \times 1\text{ galón} / 3.78541\text{ L} \times 1\text{ t} / 1\ 000\ 000\ 000\text{ g} \times 1\text{ Mt} / 1\ 000\ 000\ 000\text{ t}$ ) al año respectivamente.

## Resultados y Discusión

De acuerdo con los datos obtenidos en el Caso 1, para considerar a los VE como una verdadera opción de contribuir a la reducción de GEI en un 21% para el sector transporte, bajo un escenario al 2030, las fuentes de generación de electricidad destinada a los VEP tendrían que emitir no más de 21.1 Mt CO<sub>2</sub>e/año o el 79% de los 26.72 Mt CO<sub>2</sub>e/año que emitirían 5100 vehículos a combustión interna, lo cual sólo se podría obtener en base a la tecnología nuclear y las fuentes renovables de energía, excepto la biomasa residual (figura 1).



**Figura 1.** Comparación de emisiones ajustadas de CO<sub>2</sub>e a ser generadas por 5100 vehículos a combustión interna y la generación de electricidad a ser requerida por 5100 VE (valores para el Escenario al 2030).

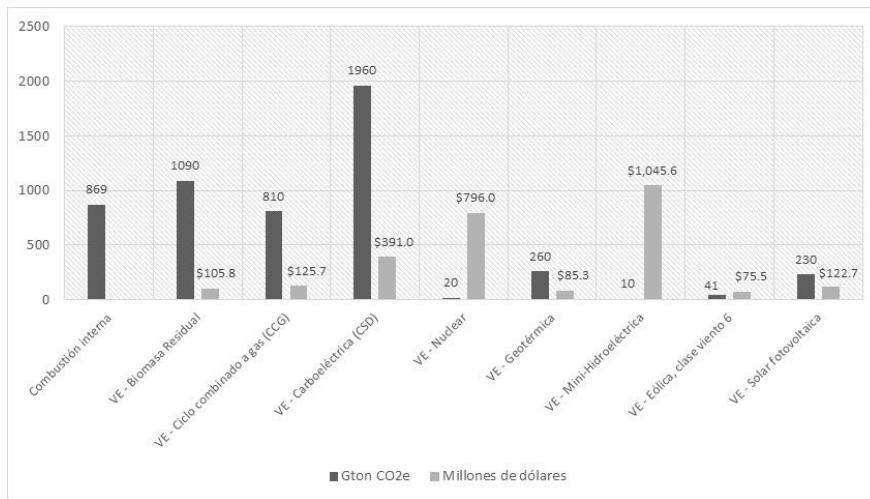
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos.

Sin embargo, considerando como un segundo factor clave de toma de decisión al costo nivelado de generación, las tecnologías más factibles para suministrar la electricidad necesaria serían solo las tecnologías geotérmicas, solar fotovoltaica y eólica.

De hecho, conforme a *International Renewable Energy Agency* (Irena, 2016), el éxito de una transición a VE requiere de una descarbonización en el sistema de generación eléctrica –tal como lo muestran los resultados previos en donde sólo las fuentes renovables de energía permitirían cumplir con

el 21% de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>e provenientes del sector a un costo competitivo de generación–y la integración de estos a la red como una fuente móvil de almacenamiento de energía.

En cuanto al análisis del Caso 2, los AER resultan ser una opción viable para contribuir en la reducción de las emisiones de GEI del sector transporte en un 21% respecto a un escenario de uso de combustibles fósiles (reduciendo de 1.1 Mt de CO<sub>2</sub>e/año a 0.87 Mt de CO<sub>2</sub>e/año), siempre y cuando la energía eléctrica requerida sea suministrada por las tecnologías: ciclo combinado a gas, nuclear, geotérmica, eólica y solar fotovoltaica (figura 2).



**Figura 2.** Comparación de emisiones ajustadas de CO<sub>2</sub>e a ser generadas por 20 000 autobuses a combustión interna y la generación de electricidad a ser requerida por 20 000 AER (valores para el Escenario al 2030).  
 Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos.

No obstante, si se considera nuevamente el criterio de decisión de costos nivelados de generación eléctrica a mediano plazo, las tecnologías más factibles serían solo las de ciclo combinado a gas, geotérmica, solar fotovoltaica y eólica. De hecho, para el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América (EERE, 2017b), utilizar fuentes de energía limpia en el uso de vehículos de combustión interna a diésel y gasolina ha demostrado amplias ventajas sobre el ciclo de vida de las emisiones.

Aunado a lo anterior, es importante mencionar que en el Inventario Nacional de Energías Renovables (Inere) generado por la Sener (sf), las fuentes de generación de energía eléctrica basadas en recursos renovables comprobadas para la ZMVM sólo son: biomasa con un potencial de 1.1 TWh/año en el Estado de México y geotermia con 1.2 TWh/año en el Estado de Hidalgo, potencial conjugado que podría satisfacer sin ningún problema los 1.97 TWh/año que requerirían los 20 000 AER o los 115.6 GWh/año que demandarían 5100 VE en la ZMVM al año 2030.

Por lo que resulta conveniente explorar el potencial de la energía geotérmica en la región dados sus bajos niveles de emisiones de carbono equivalente y su bajo costo nivelado de generación a mediano plazo. También conviene examinar la viabilidad de proyectos de generación basados en la biomasa disponible en el Estado de México, ya que la descomposición de esta genera gas metano que tiene un mayor impacto como gas de efecto invernadero que el dióxido de carbono generado por su combustión, además de que su consumo disminuiría áreas y espacios destinados a rellenos sanitarios.

Para el caso del subsector autotransporte de carga, Caso 3, la transición al GNL como principal combustible permitiría satisfacer casi en su totalidad la reducción de emisiones de GEI que México tiene como meta al mediano plazo, al reducir en 20% las emisiones de carbono equivalente; no obstante, la principal desventaja de este sistema de combustión es que no existen estaciones de recarga a lo largo de la red de autopistas y carreteras del país, situación que no se visualiza cambie en el corto y mediano plazo dada la demanda creciente de gas natural en el sector industrial y de generación de energía eléctrica.

Es así como al analizar la opción de vehículos híbridos eléctrico/diésel resulta una opción adecuada para reducir en 21% las emisiones de GEI, siempre y cuando la electricidad requerida provenga de las siguientes tecnologías de generación: ciclo combinado a gas, nuclear, geotérmica, eólica y solar fotovoltaica. Opciones que se acotarían sólo a ciclo combinado a gas, geotérmica, eólica y solar fotovoltaica, si se toma en cuenta el criterio de costo nivelado de generación al año 2030 (figura 3).

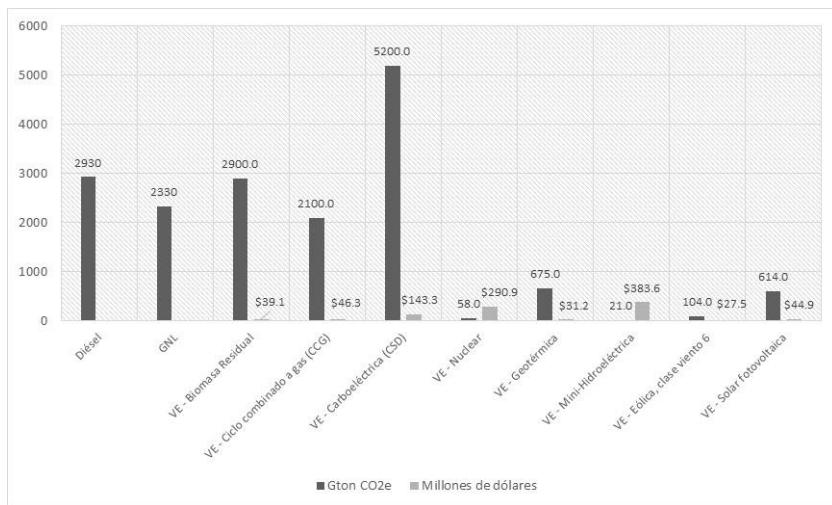


Figura 3. Comparación de emisiones ajustadas de CO<sub>2</sub>e a ser generadas por 25 146 tractocamiones a combustión interna y la generación de electricidad a ser requerida por 25 146 VH (valores para el Escenario al 2030).

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos.

En este último caso, dado que la electrificación de la red de autopistas involucra grandes extensiones del territorio, se tendría que tomar en cuenta el potencial regional de fuentes renovables de energía indicado en el Inere.

## Conclusiones

Dados los resultados arrojados en el análisis antes realizado, se puede concluir que para que los vehículos eléctricos sean una verdadera opción de reducción de emisiones de carbono equivalente para el sector transporte en México, la energía eléctrica a consumirse deberá provenir de fuentes limpias de energía y, en específico, de fuentes renovables, dados sus bajos niveles de intensidad de carbono equivalente.

Resulta conveniente, por lo tanto, explorar y explotar en el corto plazo el potencial de las fuentes renovables de energía identificadas en el Inere como potenciales para cada región, ya que esto permitiría: independencia energética regional, utilizar recursos subutilizados en la actualidad y bajos costos de generación en el mediano plazo dada la alta competitividad de los LCOE de las fuentes renovables de energía, respecto a tecnologías convencionales.

Es necesario realizar estudios alternos de simulación en donde se tomen en cuenta los factores de implementación de la red inteligente de energía, capacidad del sistema eléctrico nacional para interconectar a las fuentes renovables y sus posibles limitaciones, así como los planes de reducción de pérdidas no técnicas planteadas por Sener (2015a) y CFE (2013) a corto y mediano plazo.

## Referencias

- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2013). *Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte*. Recuperado el 9 de julio de 2018 de <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/3613/Estrategias%20de%20mitigaci%C3%B3n%20y%20m%C3%A9todos%20para%20la%20estimaci%C3%B3n%20de%20las%20emisiones%20de%20gases%20efecto%20invernadero.%20En%20el%20sector%20transporte..pdf?sequence=4>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2013). *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico*. México: Edición 33, Subdirección de Programación.
- Consejo Coordinador Empresarial (CCE). (18 de marzo de 2015). *Ciudades Sustentables*. Recuperado el 12 de enero del 2016 de <http://www.cespedes.org.mx/ciudades-sustentables/>
- El Universal (2015). Puente fronterizo en Nuevo Laredo genera 75 mmdd. Recuperado el 22 de mayo de 2017 de <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2015/10/13/puente-fronterizo-en-nuevo-laredo-genera-75-mmdd>
- Energeix (2015). *Hoja técnica de especificaciones, Diésel UBA*. Recuperado el 3 de febrero de 2017 de [https://www.grupoenergeticos.com/es/wp-content/uploads/2015/02/ficha\\_tecnica-diesel.pdf](https://www.grupoenergeticos.com/es/wp-content/uploads/2015/02/ficha_tecnica-diesel.pdf)
- Enjian, Y., Zhiqiang, Y., Yuanyuan, S., & Ting, Z. (2013). Comparison of electric vehicle's energy consumption factors for different road types. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, (328757). doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/328757>
- Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal (Fimevic). (2014). *Diagnóstico de la movilidad de las personas en la Ciudad de México*.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEEEx). (2017). *Smart Grids: Electricity for the future*. Recuperado el 12 de noviembre de 2017 de <https://www.edx.org/course/smart-grids-electricity-future-ieeeex-smartgrid-x-0>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016). *Electric vehicles. Technology brief*. Recuperado el 7 de mayo de 2017 de [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_Electric\\_Vehicles\\_2017.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Electric_Vehicles_2017.pdf)
- Johnson, T., Alatorre, C., Romo, Z., & Liu, F. (2009). *México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono*. Recuperado el 14 de noviembre de 2016. doi: <https://doi.org/10.1596/978-9-5883-0775-6>
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE). (2017a). *Natural Gas Vehicle Emissions*. Recuperado el 14 de diciembre de 2016. Recuperado de [https://afdc.energy.gov/vehicles/natural\\_gas\\_emissions.html](https://afdc.energy.gov/vehicles/natural_gas_emissions.html).
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE). (2017b). *Benefits and considerations of electricity as a vehicle fuel*. Consultado el 14 de diciembre de 2016. Recuperado de [http://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity\\_benefits.html](http://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity_benefits.html).
- Muñoz, M. (13 de mayo de 2016). Construyen autobús eléctrico de transporte público. *CONACYT Agencia Informativa*. Recuperado el 3 de febrero de 2017 de <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/transportes/7345-mexicanos-construyen-primer-autobus-electrico-para-transporte-publico>
- The Natural Resources Defense Council (NRDC). (2010). *GHG emission factors for high carbon intensity crude oils*. Recuperado el 15 de enero de 2017 de [https://www.nrdc.org/sites/default/files/ene\\_10070101a.pdf](https://www.nrdc.org/sites/default/files/ene_10070101a.pdf)
- New Zealand Ministry for the Environment (NZMFE). (2015). *Summary of emissions factors for the guidance for voluntary corporate greenhouse gas reporting – 2015*. Recuperado el 5 de junio de 2017 de <http://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/media/Climate%20Change/voluntary-ghg-reporting-summary-tables-emissions-factors-2015.pdf>

- Sandoval-García, E. (2016). *Análisis prospectivo del portafolio tecnológico de generación eléctrica en México al año 2030 y 2050* (Tesis doctoral). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.
- Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., & Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), 1488-1499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.018>
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). (2015). *Principales estadísticas del sector comunicaciones y transportes 2015*. Consultado el 19 de enero de 2017. Recuperado de [http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGP/estadistica/Principales-  
Estadisticas/Principales-Estadisticas-2015.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGP/estadistica/Principales-Estadisticas/Principales-Estadisticas-2015.pdf)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2015). *México rumbo a la COP-21*. Recuperado el 13 de abril de 2016 de <http://www.depfe.unam.mx/actividades/15/Paris2015sem-SEMARNAT.pdf>
- Secretaría de Energía (Sener). (2015a). *Programa de desarrollo del sector eléctrico nacional, PRODESEN 2015-2029*. Recuperado el 13 de agosto de 2016 de [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/54139/PRODESEN\\_FINAL\\_INTEGRADO\\_04\\_agosto\\_Indice\\_OK.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/54139/PRODESEN_FINAL_INTEGRADO_04_agosto_Indice_OK.pdf)
- Secretaría de Energía (Sener). (2015b). *Prospectiva del Sector Eléctrico Nacional 2015 - 2029*. Recuperado el 23 de mayo de 2017. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva\\_del\\_Sector\\_Electrico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf)
- Secretaría de Energía (Sener). (sf). *Inventario nacional de energías renovables*. Recuperado el 13 de septiembre del 2016 de <http://inere.energia.gob.mx/version4.5/>
- Parliamentary Office of Science & Technology (UK-POST). (2011). Carbon footprint of electricity generation. Recuperado el 10 de junio de 2013 de [http://www.parliament.uk/documents/post/postpn\\_383-carbon-footprint-electricity-generation.pdf](http://www.parliament.uk/documents/post/postpn_383-carbon-footprint-electricity-generation.pdf).
- Villavicencio, A. (18 de mayo de 2016). Ciudad de México y Edomex renovarán flota de transporte público. *Excelsior*. Recuperado el 25 de enero de 2017 de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/05/18/1093360>
- VTT (2005). *Heavy-duty truck emissions and fuel consumption simulating real-world driving in laboratory conditions*. Recuperado el 14 de abril de 2017 de [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f9/2005\\_deer\\_erkkila.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f9/2005_deer_erkkila.pdf)
- Wong, W. (2005). *Compressed natural gas as an alternative fuel in diesel engines* (Bachelor of Engineering Dissertation). University of Southern Queensland, Estados Unidos de América.

## Abreviaturas

AER	Autobuses Eléctricos Renovados
APV	Advanced Power Vehicles
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CCE	Consejo Coordinador Empresarial
CFE	Comisión Federal de Electricidad
Conacyt	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CO <sub>2e</sub>	Dióxido de carbono equivalente
EERE	Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
FCE	Factor de consumo eléctrico
Fimevic	Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal
GEI	Gases de efecto invernadero
GHG	Green house gases

GNL	Gas natural licuado
GWh	Giga watt hora
HMD	Horarios de máxima demanda
ICe	Intensidad de carbono equivalente (t CO <sub>2</sub> e/MWh)
IEEEEx	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Inere	Inventario Nacional de Energías Renovables
kcal/kg	Kilocaloría sobre kilogramo
kg/L	Kilogramo sobre litro
km	Kilómetro
kWh	Kilowatt hora
LCOE	Levelized Cost of Energy (costo nivelado de energía)
MJ	Mega Joule
Mt	Megatonelada
MWh	Mega watt hora
NOx	Óxidos de nitrógeno
NRDC	The Natural Resources Defense Council
NZMFE	New Zealand Ministry for the Environment
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transporte
Semarnat	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Sener	Secretaría de Energía
t	Tonelada
TWh	Tera watt hora
UBA	Diésel Ultra Bajo Azufre
UK-POST	Parliamentary Office of Science & Technology, United Kingdom
VE	Vehículo eléctrico
VEP	Vehículo eléctrico particular
VH	Vehículo híbrido
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México