



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

ESTUDIO PROSPECTIVO PARA LA TRANSICIÓN HACIA UN SISTEMA DE
TRANSPORTE PÚBLICO CERO EMISIONES EN CIUDADES DE TAMAÑO
MEDIANO EN MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
M.I. JOSÉ TOMÁS SÁNCHEZ SILVA

TUTOR PRINCIPAL:
JESÚS ANTONIO DEL RÍO PORTILLA (IER-UNAM)

COMITÉ TUTOR:
DRA. MARÍA ELENA LÁRRAGA RAMÍREZ (IINGEN-UNAM)
DR. AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ (IER-UNAM)
DR. MIGUEL ROBLES PÉREZ (IER-UNAM)
DR. CARLOS GERSHENSON GARCÍA (IIMAS-UNAM)

TEMIXCO, MORELOS, ENERO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Sánchez Juárez Aarón

Secretario: Dra. Lárraga Ramírez María Elena

1er. Vocal: Dr. Del Río Portilla Jesús Antonio

2do. Vocal: Dr. Gershenson García Carlos

3er. Vocal: Dr. Robles Pérez Miguel.

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Energías Renovables, UNAM.

Temixco, Morelos.

TUTOR DE TESIS

DR. JESÚS ANTONIO DEL RÍO PORTILLA

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM.

FIRMA

Agradecimientos.

A mis padres por ser ejemplo de constancia y dedicación.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado durante el transcurso de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Antonio del Río, al Dr. Aarón Sánchez por su invaluable apoyo, orientación, confianza y transmisión de conocimiento para la realización de este trabajo. Así mismo, agradezco a los Doctores Miguel Robles Pérez, Carlos Gershenson García y a la Dra. María Elena Lárraga por sus comentarios y aportes al presente trabajo.

Agradezco a Fernando Orozco Miranda, al personal de trabajo de la ruta gris y ruta uno el apoyo proporcionado y las facilidades otorgadas durante el desarrollo de este trabajo.

Índice general

1. Introducción.	1
1.1. Objetivo General.	5
1.1.1. Objetivos específicos.	5
2. Transporte público.	7
3. Combustibles y tarifas eléctricas en México.	10
3.1. Tarifas eléctricas en México.	10
3.1.1. Tarifa doméstica.	10
3.1.2. Tarifa comercial.	11
3.1.3. Tarifa industrial.	11
4. Movilidad eléctrica.	13
4.1. Movilidad eléctrica colectiva.	15
5. Fuentes renovables de energía y movilidad eléctrica.	17
5.1. Sistemas Fotovoltaicos Interconectados.	17
5.2. Generación de energía eléctrica solar fotovoltaica.	19
6. Casos de estudio.	20
6.1. Servicio de Transporte Público Ruta Uno.	20
6.2. Ruta Gris Morelia.	20
6.3. Metodología.	21
6.4. Costos Movilidad Combustión Interna.	23
6.4.1. Costo Total.	24
6.5. Costos movilidad eléctrica.	24
6.6. Búsqueda y selección de vehículos eléctricos	25
6.7. Demanda Energética.	27
6.8. Generación de Energía Fotovoltaica.	27
6.9. Emisiones de CO_2	29
6.9.1. Disminución de emisiones.	31
6.10. Análisis Económico.	31
6.11. Estrategia operativa con vehículos eléctricos.	32
7. Resultados.	34
7.1. Costo movilidad combustión interna.	34
7.2. Comparación costos movilidad eléctrica vs combustión interna.	35

7.3. Demanda energética movilidad eléctrica.	36
7.3.1. Aporte fotovoltaico.	37
7.4. Emisiones de CO2.	37
7.5. Análisis económico.	38
7.6. Propuesta de Estrategia Operativa.	39
7.6.1. Flotilla eléctrica.	43
Conclusiones	44
Anexos	51

Índice de figuras

4.1.	Vehículo Eléctrico a Baterías. (Imagen tomada de https://electricvehicle.wiki/e-mobility-in-india/ y modificada por el autor).	14
4.2.	Vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable. (Imagen tomada de https://electricvehicle.wiki/e-mobility-in-india/ y modificada por el autor).	15
4.3.	Autobús eléctrico de la marca Build Your Dreams BYD. (Imagen tomada de www.en.byd.com/bus/).	16
4.4.	Vagoneta eléctrica de pasajeros. (Imagen tomada de www.ruraltransit.org).	16
5.1.	Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico interconectado al SEN	18
6.1.	Trayecto Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. (Imagen tomada de www.openstreetmap.org y modificada por el autor)	21
6.2.	Recorrido realizado por las unidades de la Ruta Gris en Morelia. (Imagen tomada de www.openstreetmap.org y modificada por el autor).	22
6.3.	El diagrama ilustra la metodología de este trabajo.	23
6.4.	Vagoneta eléctrica seleccionada para la ciudad de Morelia, Michoacán. (Imagen tomada de www.rockrich.com.cn)	26
6.5.	Camión eléctrico seleccionado para la ciudad de Cuernavaca, Morelos. (Imagen tomada de www.rockrich.com.cn)	26
6.6.	Esquema sistema fotovoltaico en las instalaciones de la Ruta Gris en la ciudad de Morelia.	28
6.7.	Sistema fotovoltaico en la terminal de la Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca.	28
6.8.	Sistema fotovoltaico en un predio usado por la Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca.	29
7.1.	Costo anual combustible por tipo de vehículo, Morelia y Cuernavaca.	35
7.2.	Comparación costo anual movilidad combustión interna vs movilidad eléctrica.	36
7.3.	Generación de energía mensual SFV Cuernavaca.	37
7.4.	Generación de energía mensual SFV Morelia.	38
7.5.	Emisiones anuales de CO ₂	38
7.6.	Evaluación económica de los dos escenarios.	40
7.7.	Día típico Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca.	42
7.8.	Rango de trabajo de la vagoneta eléctrica E5.	43
7.9.	Rango de trabajo del camión eléctrico Ebus.	44
10.	Solicitud de información sistema de transporte público a la Comisión Coordinadora del Transporte.	51
11.	Solicitud de información parque vehicular a la ruta gris.	52
12.	Solicitud de información operativa de la ruta gris.	53
13.	Características técnicas vagoneta eléctrica.	54

14.	Características técnicas Bus Eléctrico.	54
15.	Características técnicas módulo fotovoltaico.	55

Índice de tablas

3.1. Clasificación de las tarifas de acuerdo a la temperatura ambiente y el consumo de energía.	11
3.2. Clasificación de las tarifa comercial de acuerdo a la demanda de energía.	11
3.3. Clasificación de las tarifa industrial de acuerdo a la demanda de energía.	11
3.4. Horarios tarifa GDMTH del mes de Abril a Octubre	12
3.5. Horarios tarifa GDMTH del mes de Octubre a Abril	12
3.6. Precio de la energía tarifa GDMTH	12
6.1. Tiempos y distancias de la rutas en un día típico de trabajo.	21
6.2. Parametros para determinar costos de combustible.	24
6.3. Características VEs seleccionados.	25
6.4. Generación de energía mensual de los sistemas fotovoltaicos propuestos en ambas ciudades.	30
6.5. Factores de emisión de CO ₂ para los distintos tipos de combustible. Para las gasolinas Magna y Premium las unidades son (kgCO ₂ /l) para electricidad es (TON CO ₂ /MWh).	30
6.6. Rendimientos de los VCI utilizados por las rutas de transporte público en las ciudades caso de estudio. El rendimiento esta expresado en litros por kilómetro.	30
7.1. Costo por kilometro movilidad combustión interna.	34
7.2. Comparación costos por kilometro movilidad combustión interna vs movilidad eléctrica.	35
7.3. Demanda anual de energía de los vehículos eléctricos seleccionados.	36
7.4. Emisiones anuales de CO ₂ (en TON) movilidad combustión interna, movilidad eléctrica con energía totalmente proveniente de la RED y movilidad eléctrica con energía fotovoltaica.	37
7.5. Consideraciones en la evaluación económica.	39
7.6. Evaluación Valor Presente Neto de los dos escenarios.	39
7.7. Valor presente neto de la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos.	39
7.8. Día típico de operaciones de la Ruta Gris en la ciudad de Morelia.	40
7.9. Requerimientos operativos de la rutas de transporte y cantidad mínima de vehículos de combustión interna necesarios.	43
7.10. Cantidad de viajes que pueden ser realizados por los vehículos eléctricos con una carga completa.	43
7.11. Flotillas de Vehículos eléctricos considerando potencia de cargador de 200kW.	44
7.12. Valor Presente Neto de las Flotillas de Vehículos Eléctricos para la ciudad de Morelia y Cuernavaca.	44

Resumen

Este trabajo de investigación presenta un análisis económico que ilustra la viabilidad y los posibles beneficios relacionados con el reemplazo de vehículos de combustión interna (VCI) por vehículos eléctricos (VE) utilizados para proveer el servicio de transporte público en ciudades medianas en México. De acuerdo a las condiciones actuales de operación del servicio de transporte público, se calculan los costos operativos de los vehículos de combustión interna y se comparan con los costos de vehículos eléctricos, cuya capacidad de pasajeros es similar. Las emisiones de CO₂ se calculan para ambos casos. Sin embargo, para el caso de la movilidad eléctrica, analizamos dos escenarios: i) El uso de la Red Eléctrica de Distribución (RED) para la carga de energía de los vehículos eléctricos y ii) Un sistema fotovoltaico dispuesto en las instalaciones de las rutas de transporte público. El Valor Presente Neto (VPN) indica la viabilidad de los dos escenarios de reemplazo planteados: Flotila de vehículos eléctricos usando energía proveniente de la RED y flotilla de vehículos eléctricos con un sistema generador de energía eléctrica fotovoltaica interconectado a la RED. El análisis económico contempla los diferentes precios de la energía de acuerdo a los esquemas tarifarios existentes en México. Dada la matriz energética de México, en el caso de las emisiones de CO₂, son menores a lo pensado únicamente con la energía eléctrica suministrada por la RED, sin embargo, se encontró que un sistema fotovoltaico reduce más de 30 % las emisiones de CO₂. Por último, una estrategia operativa utilizando flotillas 100 % eléctricas es propuesta. Este trabajo de investigación fue llevado a cabo en dos ciudades de tamaño mediano en México; Cuernavaca, capital del estado de Morelos y Morelia, ciudad capital del estado de Michoacán.

Capítulo 1

Introducción.

El proceso de cambio climático, por sus implicaciones tanto económicas como sociales y ambientales, representa un problema global de gran relevancia. Muchos países, instituciones y organizaciones están promoviendo y tomando acciones para enfrentar este problema. El Acuerdo de París ha fijado el objetivo de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2°C y de proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1.5°C. Los objetivos abordan estrategias futuras de neutralidad de carbono como sus objetivos de mitigación de emisiones a largo plazo para mediados del siglo XXI. Hasta el momento, más de 130 países y regiones se han comprometido con objetivos de cero emisiones netas o de neutralidad de carbono [1].

El sector transporte contribuye en gran medida al incremento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI); además, es un sector vulnerable a la escasez de combustibles y al aumento de sus precios. Tan solo en México, en el año 2015 se emitieron 171,353.35 Gg CO₂, de las cuales el 90 % corresponden al sector autotransporte, es decir 159,944 Gg CO₂ [2].

En México, como en muchos otros países de América latina, la gran mayoría de los sistemas de transporte público han empleado combustibles fósiles para su operación. Además, generalmente, el servicio ha sido provisto por vehículos de combustión interna viejos, ineficientes y contaminantes. En México las alternativas de movilidad colectiva han sido poco exploradas. Era necesario buscar estrategias y alternativas que mitigaran los inconvenientes provocados por el uso masivo de combustibles fósiles en automóviles, particularmente en el transporte colectivo de pasajeros. La movilidad eléctrica podría representar una movilidad con cero emisiones, para ello es fundamental descarbonizar las redes eléctricas, Qingbin Song et al. [3] demostraron que en Macau China, la sustitución de camiones a Diesel de transporte público por buses eléctricos incrementaría considerablemente las emisiones contaminantes, ya que para la generación de energía eléctrica que sería suministrada a la flotilla de camiones eléctricos se utilizarían combustibles fósiles. Los vehículos eléctricos ofrecen oportunidades ideales para la introducción de las energías renovables en el sector del transporte, dado que consumen energía que puede ser suministrada por fuentes de energía renovable. Uno de los beneficios asociados a la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos es la reducción de las emisiones de CO₂, la disminución de la contaminación del aire y de la contaminación acústica. La movilidad eléctrica también genera importantes ganancias de eficiencia y podría surgir como una importante fuente de almacenamiento para fuentes variables de electricidad renovable [4]. Debido a la caída de los precios de la energía solar fotovoltaica (FV) en la última década, la electricidad solar es atractiva para proporcionar energía para la electromovilidad [5]. Numerosos trabajos han abordado el tema de la movilidad eléctrica, por ejemplo Ruggieri et al. [6] analizaron la disminución de la contaminación del aire en seis ciudades europeas (Londres, Hamburgo, Oslo, Milán, Florencia y Bolonia) con un rápido desarrollo de vehículos eléctricos debido a las políticas de movilidad eléctrica.

M.J Booyesen et al. [7] estudiaron vehículos eléctricos con energía solar para el transporte público informal sostenible en Uganda, los resultados muestran que la demanda energética media de la flota de taxis fue de 220 kWh con un potencial de carga medio (tiempo estacionario) entre taxis de 8h/d a 12h/d. El potencial medio para la carga de la energía solar fotovoltaica osciló entre 0.24 kWh/m² a 0.52 kWh/m² por día. Mariusz Kubanski [8] analizó la introducción de autobuses eléctricos de uso común en el transporte público en Czechowice-Dziedzice. Realizó un análisis comparativo de la aplicación de autobuses diésel, híbridos y eléctricos en el transporte público en Czechowice-Dziedzice. En particular, consideraron las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de autobuses con base en un cálculo simplificado de costos, teniendo en cuenta el costo de compra y el costo de operación. Nathan Parker et al. [9] estimaron los costos de propiedad de 5 años para cuatro vehículos eléctricos y cuatro vehículos a gasolina por vecindario en todo el condado de Los Ángeles, en Estados Unidos. Descubrieron que, debido a la variación en las tarifas de electricidad, las tarifas de seguros y las millas recorridas por los vehículos, el costo medio varía entre los vecindarios por un factor de entre 1.2 y 1.35, según el vehículo. Además, los costos medios de propiedad suelen ser más altos para los vehículos eléctricos que para los coches de gasolina, pero si se tiene en cuenta la distribución completa de los kilómetros recorridos por vehículo, se sugiere que comprar un vehículo eléctrico supone un ahorro de más del 17%. Marc Schmidt et al. [10] abordaron el problema de la electrificación de flotas mediante el análisis de un conjunto de datos de 81 patrones de movilidad empíricos de flotas comerciales. Realizaron una simulación para diseñar un sistema de apoyo a la toma de decisiones para los administradores de flotas que evalúan qué flotas tienen un potencial adecuado para la electrificación y cómo las flotas pueden mejorar la cantidad de viajes eléctricos exitosos al adaptar su estrategia de carga. Mads Greager [11] propuso un modelo teórico que cubre tanto la entrada de estaciones de carga como las ventas de vehículos eléctricos. El modelo se utilizó para estudiar políticas para desarrollar una buena red de carga para propietarios de vehículos eléctricos actuales y futuros. Chandra Mouli et al. [12] analizaron la carga directa de vehículos eléctricos utilizando un sistema fotovoltaico conectado a la red de 10kWp, comparó los costos de operación entre VCI y EV, conducir un EV en lugar de VCI genera un ahorro anual de 1.520 € y reduce emisiones de CO₂ a 770 kg/coche/año para una distancia de 20.000 km. Además, encontraron que una conducción cero emisiones en los países bajos es posible usando un sistema de energía solar de 13kW, el cual es capaz de proporcionar en promedio, una carga anual de 70,300 km para un Nissan Leaf ó 49,620 km para un Tesla Model-S, además el costo de la energía solar es de 10c/kWh, menor al costo de la energía proveniente de la red de 23c/kWh. Tang et al. [13] usan un modelo de optimización energética para evaluar el valor presente neto y la huella de carbono de la combinación de varias tecnologías (red eléctrica y energía fotovoltaica, vehículos eléctricos y almacenamiento de energía). El autor encontró que energizar los vehículos con energía de la red es más económico que con energía solar, pero se emite el doble de carbono, sin embargo la aplicación de impuestos por emisiones contaminantes, tasas de interés bajas y precios altos por la venta de la electricidad solar harían más rentable la implementación de la energía solar para energizar a los vehículos eléctricos. El parámetro clave es el precio de la electricidad de la red, sólo existe sinergia vehículo eléctrico/solar fotovoltaica en un rango específico del precio de la electricidad. Figueredo et al. [14] llevaron a cabo un análisis de viabilidad de un estacionamiento fotovoltaico en la ciudad de Lisboa, Portugal, sus resultados mostraron que, bajo las condiciones actuales, la recuperación de la inversión toma 14 años, sin embargo, considerando la implementación de incentivos públicos, el tiempo de retorno se reduce a 7 años. Ellen de Schepper et al. [15] mostraron los beneficios económicos del acoplamiento directo de la electricidad solar con los vehículos eléctricos. Los resultados indicaron que es más rentable invertir en vehículos eléctricos a precios bajos de electricidad (<0,112 €/kWh). Cuando el precio de la electricidad sube (>0,134 €/kWh),

la inversión exclusivamente en fotovoltaica se vuelve más atractiva. Wi et al [16] optimizó la carga eléctrica de 12 vehículos minimizando los costos totales de electricidad. La movilidad eléctrica fue modelada con la hora de llegada y de salida, la carga inteligente definida por la generación de energía fotovoltaica pudo reducir la compra de energía de la red de un 6-15 % comparado con una carga no controlada. Van der Meer et al. [17] formularon un problema de optimización para administrar la carga de 6 vehículos eléctricos en un lugar de trabajo equipado con un sistema fotovoltaico de 9kWp. La carga optimizada permite mejorar el autoconsumo en un 20 %. Guo et al. [18] desarrollaron un marco operacional para una estación de carga fotovoltaica que energiza a 300 vehículos, primero, un algoritmo calculó la energía de la red diaria necesaria y el costo marginal de electricidad para la estación, un segundo algoritmo optimizó el horario de carga de los vehículos eléctricos. Esta estrategia incrementó los ingresos del operador de la estación de carga fotovoltaica en un 3 % en verano y en un 10 % en invierno. Seedig et al. [19] consideraron una estación de carga de 100kWp que alimenta a 650 vehículos eléctricos, estos vehículos fueron divididos en tres categorías que definen su perfil de carga; carga nocturna, carga a lo largo del día, carga corta en el día. Los autores minimizaron la compra de electricidad de la red a través de algoritmos (deterministas y estocásticos). Comparado con una estrategia no controlada esta estrategia redujo los costos de la energía de la red en 86-95 %. Tulpule et al. [20] evaluaron la viabilidad económica de una estación de carga solar fotovoltaica. Los autores utilizaron un problema de optimización dinámica estocástica para definir un esquema de carga inteligente que minimice la cantidad de energía de la red eléctrica. Antti Lajunen [21] presentó un análisis de costo-beneficio de una flota de autobuses urbanos híbridos y eléctricos en operación; Los resultados indicaron que los autobuses eléctricos e híbridos enchufables tienen el mejor potencial para reducir el consumo de energía y las emisiones. Matthias Rogge et al.[22] analizan cómo y en qué medida las redes de autobuses existentes pueden electrificarse con autobuses de batería de carga rápida. Descubrieron que el 50 % de los viajes del servicio se pueden electrificar con una capacidad de carga de 300 kW y una capacidad útil de batería de 220 kWh. Esta electrificación es posible incluso en las peores condiciones utilizando los sistemas de baterías actualmente disponibles sin cambios en los horarios existentes. P. Plötz [23] presentó una descripción general de los hallazgos empíricos sobre vehículos eléctricos de batería e híbridos enchufables reales (PHEV y BEV) para EE. UU. y Alemania. Los resultados mostraron que los PHEV con alrededor de 60 km de autonomía en el mundo real actualmente electrifican tantos kilómetros anuales como los vehículos BEV con una batería mucho más pequeña. Además, encontró que el uso de energías renovables puede contribuir en gran medida a reducir los gases de efecto invernadero en el transporte de automóviles. Yuhua Zheng [24] et al. analizaron los efectos de la introducción de vehículos eléctricos en China, evaluaron los impactos de ahorro de energía y reducción de emisiones por la introducción proyectada de vehículos eléctricos hasta el año 2030. Definieron cinco escenarios con varias tasas de penetración de EVs; sus resultados indicaron reducciones en las emisiones de GEI del transporte y el consumo de gasolina y diésel en un 3,0 %-16,2 %, 4,4 %-16,1 % y 15,8 %-34,3 %, respectivamente, para el año 2030 bajo el escenario de penetración de EVs proyectado en China.

Estos trabajos de investigación han demostrado las bondades de la movilidad eléctrica, tanto individual como colectiva. Sin embargo, en su mayoría, estas investigaciones han tenido lugar en países de primer mundo cuyas condiciones económicas, tecnológicas y culturales favorecen a la implementación de este tipo de tecnología. Por ello, es de interés analizar la viabilidad de una movilidad eléctrica colectiva bajo las condiciones en México.

En México, la posibilidad de usar vehículos eléctricos en los sistemas de transporte públicos ha sido poco explorada. La electrificación del transporte público es una de las acciones primordiales para transitar hacia ciudades sustentables.

En este trabajo será analizada la posibilidad de electrificar dos rutas de transporte público en dos ciudades medianas en México, la Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca, Morelos y la Ruta Gris en la ciudad de Morelia, capital del estado de Michoacán.

Se ha elaborado un análisis para determinar la viabilidad económica del transporte eléctrico de pasajeros. Se consideró la implementación de sistemas fotovoltaicos para el suministro de energía de la flota vehicular eléctrica propuesta. Además, se hace una comparación de las emisiones de CO₂ bajo las condiciones actuales de operación versus la implementación del transporte eléctrico, también se ha diseñado y propuesto una estrategia operativa con flotillas 100 % eléctricas.

1.1. Objetivo General.

Determinar la viabilidad de un sistema de transporte público cero emisiones en dos ciudades medianas en México.

1.1.1. Objetivos específicos.

- Determinar la viabilidad económica de un transporte público eléctrico en la ciudad de Morelia, Michoacán y la ciudad de Cuernavaca en el estado de Morelos.
- Calcular los costos asociados al uso del transporte público actual basado en motores de combustión interna.
- Estimar los costos asociados con el reemplazo de los vehículos de combustión interna actuales por alternativas de movilidad eléctrica.
- Conocer las emisiones de CO₂ producidas por la operación del transporte público actual.
- Comparar las emisiones de CO₂ actuales vs un escenario con movilidad eléctrica.
- Proponer sistemas generadores de energía eléctrica basados en fuentes renovables para el suministro de energía de la alternativa de movilidad eléctrica.
- Comparar el escenario actual vs un escenario de movilidad eléctrica con y sin fuentes renovables de energía.

Este trabajo de investigación está estructurado en 7 capítulos, primero se presenta una introducción al tema resaltando la importancia del sector transporte y su contribución al proceso de cambio climático, así como algunos trabajos que han abordado el tema de la electromovilidad en diversos países. El segundo capítulo describe las características generales del transporte público colectivo en México. En el tercer capítulo se abordan los tipos de combustible disponibles y la energía eléctrica en México así como sus costos. El cuarto capítulo muestra el tema de la movilidad eléctrica describiendo sus beneficios y los tipos de vehículos eléctricos existentes. El quinto capítulo contiene información sobre sistemas generadores de energía renovable y movilidad eléctrica. El sexto capítulo corresponde a los casos de estudio. En ese capítulo se identifica el tipo de vehículos utilizados en ambas ciudades para proporcionar a la población el servicio de transporte público colectivo. En la ciudad de Morelia se utilizan vagonetas a gasolina marca Nissan modelo Urvan y Toyota modelo Hiace. En Cuernavaca se emplean camiones a Diesel, marca Mercedes-Benz, modelo Boxer. Se calculan los costos de combustible y las emisiones de CO₂ asociados a la operación de los diferentes vehículos. En el capítulo siete se muestran los resultados obtenidos en este trabajo de investigación. Se determina que, considerando los precios de combustible y rendimientos típicos de los vehículos, el costo por kilómetro en la ciudad de Cuernavaca, Morelos ronda los \$7.30 MXN y en la ciudad de Morelia los \$3.27 MXN para la Ruta Gris. Las emisiones de CO₂ por el uso del transporte público de la Ruta Uno y de la Ruta Gris son de 4,023 (TON) y 2,684 (TON) respectivamente. Se realiza una búsqueda y selección de vehículos eléctricos (VE) alternativos con las prestaciones necesarias para sustituir a los vehículos de combustión interna que brindan el servicio en la actualidad. Posteriormente, se determina la demanda energética y el costo por kilómetro con los VE seleccionados. Se encuentra, que la movilidad eléctrica sería un 85 % más económica que la movilidad actual basada en hidrocarburos, en la ciudad de Morelia, desplazarse un kilómetro con los VE seleccionados tiene un costo de \$0.40 MXN mientras que, en Cuernavaca costaría \$0.33 MXN, es decir, menos de un peso por kilómetro en ambos casos. Después se realiza una comparación para establecer los beneficios económicos y ambientales de la movilidad eléctrica. Dado que ambas ciudades cuentan con un recurso solar promedio del orden de los 4.5 kWh/m², se propone la opción de integrar sistemas fotovoltaicos que aporten una fracción de la demanda de energía de los vehículos eléctricos y contribuyan a la reducción de las emisiones de CO₂. La influencia de la tecnología fotovoltaica contribuye a una mayor disminución de emisiones, para la ciudad de Morelia se reducen anualmente 65 %, de 2,684 a 991 CO₂(TONs,) y 85 % para la ciudad de Cuernavaca, de 4,023 a 290 CO₂(TONs). Adicionalmente, se elabora un análisis económico usando el valor presente neto (VPN) como herramienta para evaluar la viabilidad de un sistema de transporte público eléctrico en ambas ciudades. Finalmente, se propone una estrategia operativa con flotillas 100 % eléctricas.

Capítulo 2

Transporte público.

En este capítulo se define el concepto de transporte público, se presenta un estado del arte y se describen las características generales del transporte público colectivo en México, con la finalidad de que el lector conozca la importancia, funcionamiento, y áreas de oportunidad de este sector.

El transporte público colectivo se refiere al desplazamiento de las personas en una ciudad, a través de uno o varios medios de transporte, tales como autobuses, vagonetas, metro, entre otros. Es un servicio que atiende a la mayoría de la población y de forma colectiva. Su principal característica es que moviliza a un gran número de pasajeros simultáneamente con una alta demanda [25]. El transporte público es una necesidad básica para las ciudades ya sean grandes o pequeñas. En diferentes ciudades del mundo se han realizado estudios en cuanto a la movilidad urbana los cuales han arrojado que más de un 50 % del total de la población de una ciudad no puede poseer un automóvil. En países en vías de desarrollo se puede observar de manera más directa que este tipo de población representa un porcentaje mayor, por tal motivo estas personas recurren a utilizar el servicio de transporte público. En la mayoría de las ciudades del mundo dicho servicio se da por empresas privadas que operan en una red de rutas que conectan distintos orígenes y destinos [26].

El transporte público debe entenderse como un pilar crítico de no sólo comercio, economía y movimiento social, sino también como manifestación cultural del comportamiento humano, y como tal, debe ser abordado de una manera más holística. La mejora de la sana interacción social es clave para una mejor sociedad y un medio de transporte que no perjudique el bienestar de la población. No solo es importante la satisfacción de los pasajeros, sino que también se deben disminuir las diferentes formas en que se reduce su bienestar [27]. En México, la prestación del servicio de transporte público es obligación del Estado. El servicio es concesionado por el gobierno a empresas privadas. La Comisión Coordinadora del Transporte (COCOTRA) y la Secretaría de Movilidad y Transporte, son las dependencias gubernamentales encargadas de adjudicar y regular el servicio de transporte público en las ciudades de Morelia y Cuernavaca respectivamente. Sin embargo, estas instituciones se limitan a regular únicamente las organizaciones de transporte y no pueden regular completamente el sistema. Este modelo de negocio tiene muchas desventajas, siendo la baja calidad del servicio la más relevante.

Algunos estudios han abordado el tema del transporte público en las ciudades de Cuernavaca y Morelia, por ejemplo Valenzo et al. [28] evaluaron la calidad en el servicio del sistema de transporte público en la ciudad de Morelia, México. Para tal fin, adaptaron un modelo SERVQUAL para evaluar las expectativas y las percepciones de los usuarios del transporte público en esa ciudad mediante una escala de cinco puntos, que constaba de cinco variables; tangibilidad, fiabilidad, capacidad de respuesta, seguridad y empatía. El sujeto de estudio fueron usuarios del servicio mayores de 15 años.

Para medir las expectativas, los usuarios fueron cuestionados antes de usar el servicio, para medir la percepción, fueron cuestionados después de utilizarlo. La muestra fue de 392 casos, con un total de 784 participantes. La comparación de medias muestra que los individuos tienen expectativas muy altas, con 4 o más puntos, contrario a las percepciones que presentan resultados de 3 puntos; además, de brechas entre 0.5 y 1 puntos. Concluyen que el transporte público en la ciudad de Morelia debe ser mejorado, haciendo énfasis en cuanto a la modernidad, limpieza y comodidad de los vehículos. En ese sentido, este trabajo pretende determinar si la sustitución de los actuales vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos nuevos y no contaminantes es técnica y económicamente viable.

Ortega Odette et al. [29] investigaron el nivel de eficiencia del transporte público de la ciudad de Morelia. Para ello utilizaron la metodología del Análisis de la Envoltura de Datos (DEA), llevando a cabo el cálculo de la Eficiencia Técnica Global mediante el modelo de Charnes, Cooper y Rhodes (CCR), la Eficiencia Técnica Pura con el modelo de Banker, Charnes y Cooper (BCC), y la Eficiencia de Escala (EE). Los resultados se obtuvieron a partir de las variables unidades, horas, frecuencia, viajes y kilómetros recorridos. Con los resultados obtenidos se pudo observar que la eficiencia técnica global estuvo determinada por la eficiencia de escala, donde se tuvo en promedio un nivel de eficiencia de 0.93 y la mayor parte de las unidades operaron bajo rendimientos crecientes. Con el análisis realizado se concluyó que el servicio de transporte en la ciudad es ineficiente en su mayoría aplicando los tres modelos. Baik Jinho et al. [30] realizaron un modelo microscópico para el sistema de autobuses en Cuernavaca. Muestran que la introducción de una repulsión natural produce distribuciones de matrices aleatorias en regímenes naturales de doble escala. Las técnicas empleadas incluyen caminos que no se intersectan, teoría del potencial logarítmico, procesos de puntos determinantes y análisis asintótico de varios conjuntos de polinomios ortogonales. Krbálek Milan et al. [31] analizaron las propiedades estadísticas del transporte de autobuses urbanos en Cuernavaca. Concluyeron que las propiedades estadísticas del transporte de buses urbanos pueden ser descritas por un ensamble unitario gaussiano de matrices aleatorias. Este comportamiento puede entenderse como un estado de equilibrio de un gas unidimensional que interactúa bajo el supuesto de que la información contenida en las posiciones de las partículas de gas individuales se minimiza. Warcho Piotr [32] modeló el sistema de transporte público de la ciudad de Cuernavaca, para ello, propuso un enfoque basado en agentes en el que cada conductor de autobús intenta optimizar su tiempo de llegada a la siguiente parada con respecto al tiempo de llegada estimado de su predecesor. Lima Aranzaes et al. [33] llevaron a cabo un estudio desde la perspectiva de los trabajadores de transporte público de la ciudad de Cuernavaca, cuyo objetivo fue identificar los estresores percibidos por los conductores del transporte público, ya que es importante conocer las condiciones laborales de los conductores para mejorar la prestación del servicio. En este trabajo de investigación descubrieron que los 15 elementos más estresantes de conducir un autobús como medio para ganarse la vida incluían: tráfico, presión relacionada con el tiempo, problemas de contabilidad al final del día, calor, no poder mantener el ritmo con los horarios, gente que no respeta las paradas de autobús, días con pocos o ningún pasajero, manifestantes que bloquean las calles, conductores que rebasan violentamente, fallas mecánicas del bus, problemas con las tarifas de los pasajeros, taxistas que detienen el tráfico mientras recogen pasajeros, usuarios agresivos o irrespetuosos, pasajeros que obstruyen el pasillo del autobús. Dorantes Argandar et al. [34] desarrollaron una herramienta para medir las situaciones que provocan estrés a los usuarios del transporte público en Cuernavaca. Esta nueva herramienta evalúa el estrés y su relación con el bienestar y otros elementos psicosociales en un contexto local. El desarrollo de este tipo de herramientas que permiten evaluar el estrés al que están sometidos los usuarios del transporte público es fundamental si se quiere lograr una mejora sustancial en la prestación del servicio. En conclusión, no han sido considerados estudios que determinen la viabilidad

técnica y económica para reemplazar los vehículos de combustión interna, los cuales, en su mayoría ya han excedido su vida útil, y transitar hacia una movilidad eléctrica en ciudades medianas que traería consigo beneficios ambientales como la disminución de emisiones contaminantes, reducción de ruido y ahorros económicos.

Capítulo 3

Combustibles y tarifas eléctricas en México.

En este capítulo se presentan los tipos de combustibles utilizados en México por los vehículos de combustión interna, así como sus respectivos costos. Este capítulo contiene información sobre los precios de la energía eléctrica en México y los criterios utilizados por el proveedor del servicio de energía eléctrica para establecer cada tipo de tarifa.

En México, la entidad que regula los precios de los combustibles es la Comisión Reguladora de Energía (CRE). En México existen dos tipos de gasolina: Magna y Premium. La gasolina Magna es la más usada por los conductores, debido a que su costo es menor en comparación con la gasolina Premium. El nivel de octanaje de la gasolina Magna es de 87 y el de la gasolina Premium es de 92. El costo promedio por litro de gasolina y Diesel en México ronda los \$20.00MXN [35]. La entidad encargada de suministrar el servicio de energía eléctrica es la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de las Redes Eléctricas de Distribución, pertenecientes al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

3.1. Tarifas eléctricas en México.

La Comisión Reguladora de Energía (CRE) es la institución que fija los esquemas tarifarios en el país. Los costos se basan en la demanda de energía así como en la temperatura ambiente promedio de una región, a continuación se describen los tipos de tarifas existentes así como el precio promedio por kWh.

3.1.1. Tarifa doméstica.

Estas tarifas se aplican a todos los servicios que destine la energía para uso exclusivamente doméstico, cualquiera que sea la carga conectada individualmente a cada residencia, apartamento en condominio o vivienda, pudiendo suministrarse en 1,2 y 3 hilos de corriente. La tabla 3.1 muestra la clasificación de las tarifas de energía con base en el consumo bimestral de energía y la temperatura ambiente.

Tarifa	Temperatura Ambiente (°C)	Limite de consumo bimestral (kWh)
1	Menor a 25	500
1A	25	600
1B	28	800
1C	30	1700
1D	31	2000
1E	32	4000
1F	33	5000

Tabla 3.1: Clasificación de las tarifas de acuerdo a la temperatura ambiente y el consumo de energía.

3.1.2. Tarifa comercial.

Dentro de la tarifa comercial existen distintas tarifas dependiendo de la demanda de energía eléctrica del usuario. La tarifa 2 o también denominada Pequeña Demanda en Baja Tensión (PDBT) es aplicable para servicios generales de cualquier uso hasta 25kW de demanda. La tarifa 3 o Gran Demanda en Baja Tensión (GDBT) se aplica a todos los servicios que destine la energía eléctrica en baja tensión a cualquier uso, con demanda mayor a 25kW. En la tabla 3.2 se muestran los costos por kiloWatt hora y la demanda de energía.

Tarifa	Demanda (kW)	Costo (MXN/kWh)
02/PDBT	hasta 25	2.73
03/GDMT	mayor a 25	2.38

Tabla 3.2: Clasificación de las tarifa comercial de acuerdo a la demanda de energía.

3.1.3. Tarifa industrial.

La tarifa Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria (GDMTO) o tarifa OM, se aplica a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda menor a 100kW. La tarifa HM o Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH) se aplica en servicios en media tensión para cualquier uso con una demanda de 100kW o más. La tabla 3.3 contiene la demanda de energía y los costos por kiloWatt hora para cada tarifa.

Tarifa	Demanda (kW)	Costo (MXN/kWh)
OM/GDMTO	menor a 100	1.76
HM/GDMTH	mayor a 100	1.38

Tabla 3.3: Clasificación de las tarifa industrial de acuerdo a la demanda de energía.

Tarifa GDMTH.

Dentro de las diferentes tarifas de electricidad existentes en México, la tarifa más rentable para la carga eléctrica de la flota de EVs es la GDMTH ya que es la que tiene un menor costo de energía. En esta tarifa los precios de la energía eléctrica varían en función de la hora del día y de la estación del año, teniendo tres precios y horarios; base, intermedio y punta, siendo el precio más económico

de la energía en horario base y el más costoso en horario punta. Las tablas 3.4 y 3.5 contienen los horarios base, intermedio y punta para las diferentes estaciones del año, la tabla 3.6 muestra los precios de la energía eléctrica para los diferentes horarios.

Dia de la semana	BASE	INTERMEDIO	PUNTA
		6:00-20:00	
Lunes a viernes	0:00-6:00	Y	20:00-22:00
		22:00-24:00	
Sábado	0:00-7:00	7:00-24:00	
Domingo	0:00-19:00	19:00-24	

Tabla 3.4: Horarios tarifa GDMTH del mes de Abril a Octubre

Dia de la semana	BASE	INTERMEDIO	PUNTA
		6:00-18:00	
Lunes a viernes	0:00-6:00	Y	18:00-22:00
		22:00-24:00	
		8:00-19:00	
Sábado	0:00-8:00	Y	
		21:00-24:00	
Domingo	0:00-18:00	18:00-24:00	

Tabla 3.5: Horarios tarifa GDMTH del mes de Octubre a Abril

Costo Base	Costo Intermedio	Costo Punta
MXN/kWh	MXN/kWh	MXN/kWh
\$0.962	\$1.15	\$2.30

Tabla 3.6: Precio de la energía tarifa GDMTH

Como se puede apreciar en la tabla el mayor precio de energía ocurre en un horario que comprende de las 20:00 a las 22:00 horas. Adicionalmente la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E) cobra por concepto de distribución y capacidad de energía la cantidad de \$216MXN/kW y \$307MXN/kW promedio mensual respectivamente, estos costos pueden ser calculados a partir de la ecuación 3.1

$$Demanda = \frac{Qmensual}{24 * d * F.C.} \quad (3.1)$$

Donde la $Qmensual$ es el consumo mensual de energía (kWh), 24 es el número de horas en un día, d es la cantidad de días en el periodo de cobro y $F.C.$ es el factor de carga (proporcionado por CFE) el cual tiene un valor de 0.57.

Una vez que se conocen los precios de los combustibles, así como los diferentes precios de la energía eléctrica en México, es posible comparar costos operativos entre vehículos de combustión interna y vehículos eléctricos, analizando la viabilidad de una movilidad eléctrica colectiva.

Capítulo 4

Movilidad eléctrica.

Este capítulo presenta un estado del arte sobre la movilidad eléctrica, se definen conceptos relacionados a la misma, de tal manera que el lector pueda identificar las diferencias existentes entre los vehículos eléctricos y los vehículos de combustión interna.

El auge del automóvil comenzó a finales del siglo XIX con los vehículos eléctricos, pero el motor de combustión interna se hizo dominante a partir de 1910, debido a las ventajas en tamaño y autonomía que ofrecían los combustibles líquidos. Los viajes en automóvil se incrementaron enormemente durante el siglo XX como resultado del progreso técnico y la caída de los costos de infraestructura (rutas, carreteras, equipos), de vehículos (rendimiento y confiabilidad, comodidad y ergonomía), sistemas (señalización, gestión del tráfico) y servicios (abastecimiento de combustible, mantenimiento, seguros, alquiler y taxis). En el mundo desarrollado, en particular en Norte América, las infraestructuras automotrices se generalizaron y el automóvil privado se convirtió en el método dominante de transporte individual, lo que permitió a las personas acceder a una amplia variedad de actividades tanto locales como remotas.

Sin embargo, el coche también genera problemas: accidentes, ruido, contaminación del aire y emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de combustibles fósiles cada vez más escasos y caros. Las tres últimas formas de impacto se han convertido en cuestiones muy importantes del desarrollo sostenible: dado que están asociadas con el motor de combustión interna, una forma importante de reducirlas es utilizar motores eléctricos.

La movilidad eléctrica tiene una huella de carbono baja (siempre que la electricidad no se genere a partir de combustibles fósiles) y puede emplear energías renovables. Tiene menos impacto local en los niveles de ruido y la calidad del aire. Atrae hábitos de conducción ecológicos y condiciones de tráfico más tranquilas. Sin embargo, requiere una batería, que es costosa y tiene un alcance limitado (en términos de distancia de viaje). [36].

Existen dos tipos principales de vehículos eléctricos (VE):

- Vehículos Eléctricos con Baterías (BEV por sus siglas en inglés)
- Vehículos Eléctricos Híbridos enchufables (PHEV por sus siglas en inglés).

Los BEV disponen de baterías en las cuales se almacena energía y deben ser conectados a la red para su recarga. Los PHEV disponen de baterías y además cuentan con un sistema de combustible líquido y un motor de combustión interna. El stock global de vehículos eléctricos durante 2015 llegó a 1 millón y superó la marca de 3 millones en 2020[37]. Este rápido aumento ha sido liderado por China, Estados Unidos, Japón y varios países europeos. La aceptación de los vehículos eléctricos

se debe en gran medida a la reducción en los costos de la baterías, el aumento en los rangos de autonomía y el incremento de centros de carga públicos así como políticas para incentivar la compra de este tipo de vehículos. Es importante señalar, que para acelerar la implementación de los VE es necesario desarrollar una estrategia que contemple infraestructura suficiente de recarga, integración de los VE en la red eléctrica y la descarbonización de la generación de energía eléctrica. La figura 4.1 muestra la arquitectura típica de un vehículo eléctrico de baterías (paquete de baterías, conector de corriente, motor eléctrico), mientras que la figura 4.2 muestra los principales componentes de un vehículo eléctrico híbrido (motor eléctrico, paquete de baterías, electrónica de potencia, cargador, conector de corriente, tanque de combustible, motor de combustión interna y radiador).

En la siguiente sección, se aborda el tema de las alternativas eléctricas disponibles en el mercado actualmente para el transporte colectivo de pasajeros.

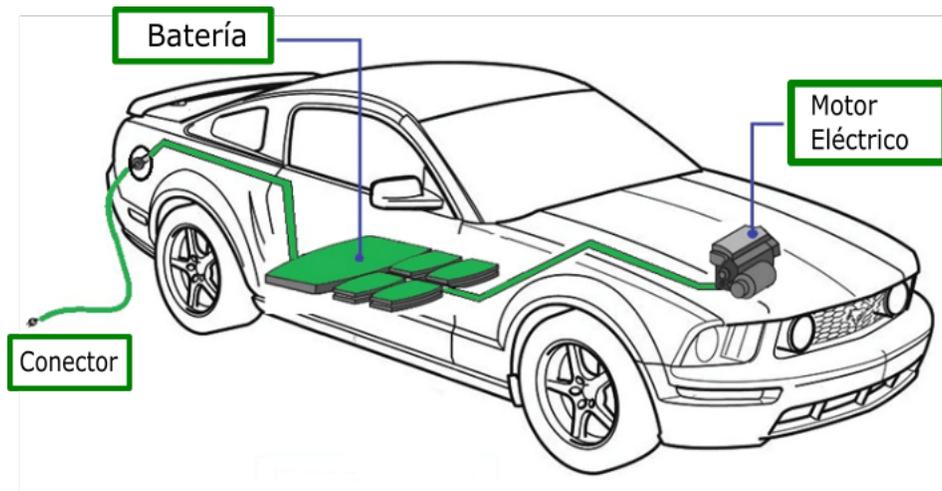


Figura 4.1: Vehículo Eléctrico a Baterías. (Imagen tomada de <https://electricvehicle.wiki/e-mobility-in-india/> y modificada por el autor).

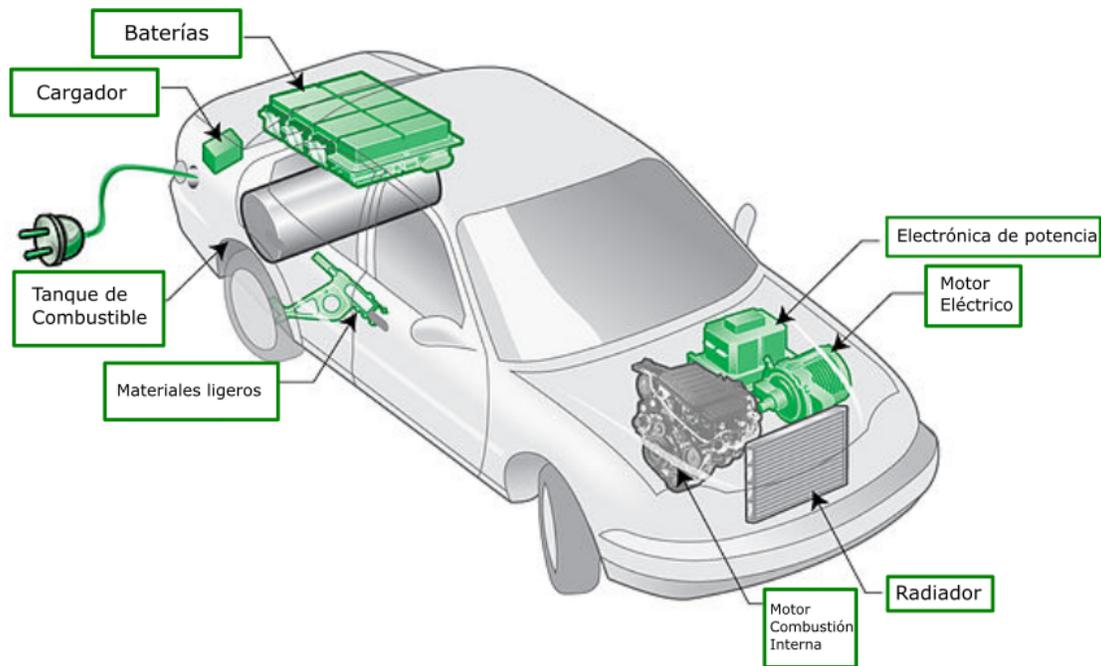


Figura 4.2: Vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable. (Imagen tomada de <https://electricvehicle.wiki/e-mobility-in-india/> y modificada por el autor).

4.1. Movilidad eléctrica colectiva.

El termino movilidad eléctrica colectiva se refiere al transporte masivo de pasajeros a través de vehículos eléctricos dispuestos para ese objetivo. A nivel mundial el desarrollo de autobuses y vagonetas eléctricas para su implementación en el sector del transporte colectivo ha ido en aumento, la mayor parte en China, y se espera que este crecimiento continúe con mayor rapidez. Según un informe de Apex Market Research en 2019 se encontraban circulando 137 mil unidades eléctricas en todo el mundo, y se prevé que el tamaño del mercado global de autobuses eléctricos alcanzará las 935 mil unidades para 2027. [38]. En América latina existen pocos casos de electromovilidad en el transporte público y los existentes se centralizan en las grandes ciudades. En la ciudad de Santiago, Chile, se ha diseñado un plan para resolver la grave problemática de contaminación del aire que incluye la electrificación del sistema de transporte colectivo, para ello han optado por utilizar 100 autobuses eléctricos fabricados por la firma china BYD (Build Your Dreams). El continente asiático es líder en la implementación y desarrollo de sistemas de movilidad eléctrica. En la ciudad de Shenzhen en China, el 100 % de los autobuses que prestan el servicio de transporte colectivo de pasajeros es eléctrico, y actualmente el 65 % de los taxis son eléctricos, el gobierno chino ofrece subsidios a las empresas de transporte colectivo y como resultado se tiene un incremento en la venta de vehículos eléctricos, invertir en el transporte verde es parte de las acciones contra la contaminación del país. En América del Norte los Estados Unidos también están implementado sistemas de transporte público eléctrico, en el condado de Fresno en California, se implemento un programa de transporte colectivo eléctrico con energía solar cuyo principal objetivo es mejorar la calidad del aire y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el valle de San Joaquín que tiene la peor calidad de aire de todo el país. El proyecto también ayuda para que California pueda alcanzar la meta que se trazo de utilizar 1.5 millones de vehículos eléctricos cero emisiones para el año 2050. [39]. La figura 4.3 muestra un

autobús eléctrico manufacturado por la compañía china BYD, en la figura 4.4 se puede apreciar la vagoneta eléctrica empleada para el transporte de pasajeros en el condado de Fresno California .



Figura 4.3: Autobús eléctrico de la marca Build Your Dreams BYD. (Imagen tomada de www.en.byd.com/bus/).



Figura 4.4: Vagoneta eléctrica de pasajeros. (Imagen tomada de www.ruraltransit.org).

Capítulo 5

Fuentes renovables de energía y movilidad eléctrica.

En este capítulo se menciona la importancia de las fuentes renovables de energía como suministradores de energía en la movilidad eléctrica, se define el concepto de sistema fotovoltaico interconectado, las partes principales que lo componen, y la manera de estimar la energía eléctrica que se puede producir con este tipo de tecnología.

Sin una adecuada planificación, el uso masivo de vehículos eléctricos podría tener impactos ambientales contraproducentes, Qingbin Song et al [3] demostró que en Macau China, la sustitución de camiones Diesel de transporte público por camiones eléctricos incrementaría las emisiones de CO₂, esto, debido a que la matriz energética para dotar de energía a los vehículos eléctricos proviene de combustibles fósiles. Es por ello que la movilidad eléctrica debe ir acompañada de generación de energía a partir de fuentes renovables. Dado que la movilidad eléctrica requiere de energía eléctrica para su operación y puesto que el Sol es una fuente de energía limpia e inagotable que puede ser aprovechada para generar energía eléctrica, en este trabajo se contempló la posibilidad de implementar un sistema de generación de energía solar fotovoltaico interconectado a la red eléctrica.

5.1. Sistemas Fotovoltaicos Interconectados.

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de elementos que permiten aprovechar la energía solar, a través de su transformación en energía eléctrica. Esta integrado por el generador fotovoltaico y acondicionadores de potencia, los cuales permiten controlar, almacenar y distribuir la energía producida por el generador a una determinada tensión y satisfacer la demanda energética. Los sistemas fotovoltaicos interconectados son generadores de energía que tienen una interacción con la RED, generan energía en Corriente Continua (CC) la cual se convierte en CA a través de un dispositivo acondicionador y sincronizador, llamado inversor. El circuito de salida del inversor se conecta en un punto de la Red Eléctrica Local (REL) del usuario al cual se le llama Punto de Acoplamiento Común (PAC), a partir del cual se distribuye la energía para energizar las cargas eléctricas locales (que para este caso serían los vehículos eléctricos) o ser inyectada a la RED del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). En este tipo de sistemas el inversor tiene la responsabilidad de sincronizarse con la Red Eléctrica de Distribución (RED), y en consecuencia debe fabricarse con características técnicas que satisfagan los requerimientos del suministrador de energía, que en México es la CFE. A continuación, en la figura 5.1 se muestra un diagrama esquemático de las partes y componentes que integran un

sistema fotovoltaico interconectado. En dicho diagrama se tiene la siguiente simbología:

- GFV: Modulo, arreglo o generador fotovoltaico.
- E: Estructura de soporte para el GFV.
- SP: Sistema de protección para seguridad.
- AP: Acondicionador de potencia o inversor.
- TAB: Tablero eléctrico de distribución o interfaz entre el GFV y el SEN.
- MB: Medidor bidireccional de energía.
- M: Medidor de energía eléctrica.
- CEL: Cargas eléctricas locales.
- SEN: Sistema eléctrico nacional.
- BOS: Siglas que denotan balance del sistema.

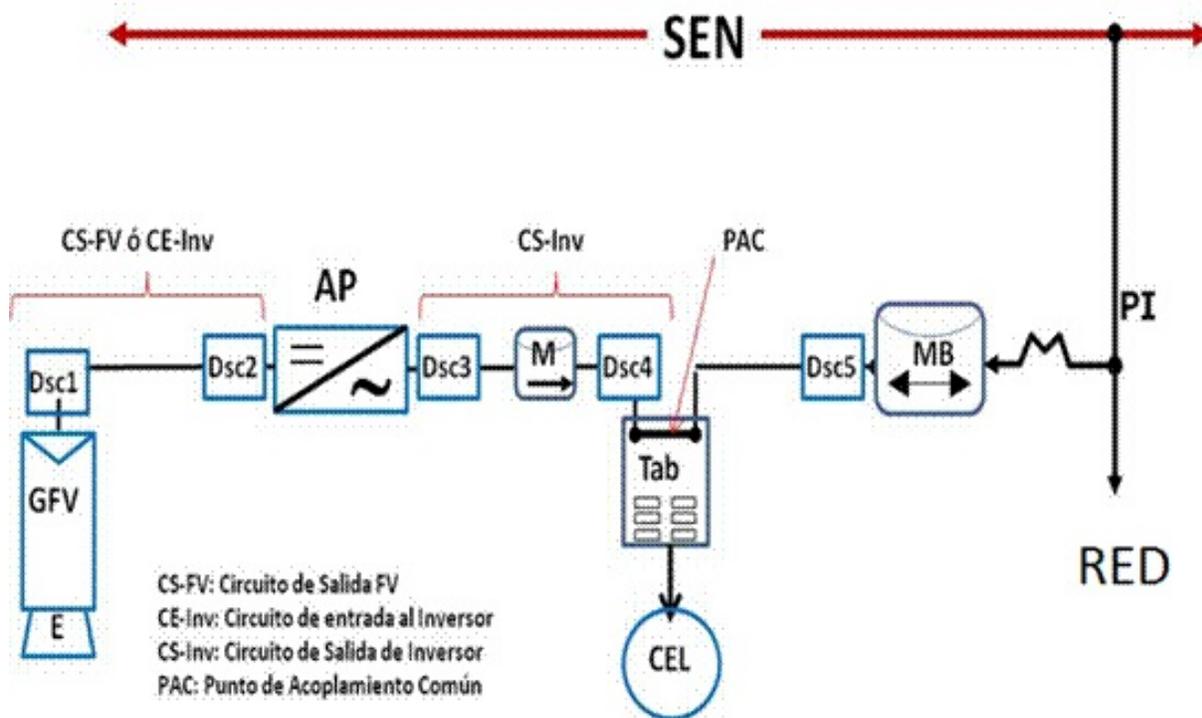


Figura 5.1: Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico interconectado al SEN

5.2. Generación de energía eléctrica solar fotovoltaica.

La cantidad de energía generada por la tecnología fotovoltaica depende directamente del aprovechamiento del recurso solar disponible, las pérdidas por conducción, el efecto de la temperatura ambiente sobre los módulos y el rendimiento eléctrico de los acondicionadores de potencia, así se tiene que la energía generada esta dada por:

$$E_{PV} = P_{PAFV} * R_S * R_t * \eta_t \quad (5.1)$$

E_{PV} define la energía generada por el sistema fotovoltaico, P_{PAFV} es la potencia pico del sistema fotovoltaico, R_S representa el recurso solar expresado en horas solares pico, R_t denota el rendimiento térmico y η_t es la eficiencia eléctrica total del sistema (cableado, controlador de carga, etc.)

La generación de energía eléctrica fotovoltaica está en función de factores ambientales propios del sitio de instalación, tales como la temperatura ambiente, la cual repercute en la temperatura de operación de la celda o modulo fotovoltaico. Es por ello que los fabricantes de TFV proveen información en forma de coeficientes C_{TP} que permiten estimar las perdidas en potencia asociadas a la temperatura.

$$C_1 = \frac{T_{NOCT} - 20}{800} \quad (5.2)$$

C_1 se refiere a la constante de propagación térmica, T_{NOCT} indica la temperatura en condiciones de operación y es un dato que el fabricante de la TFV proporciona. La temperatura de la celda se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$T_C = T_{amb} + C_1 G \quad (5.3)$$

La T_{amb} es la temperatura ambiente en el lugar donde se encuentra la TFV, C_1 es la constante de propagación y G es el valor de la irradiancia en condiciones estándar ($1000W/m^2$)

La diferencia de temperatura esta dada por:

$$\Delta_T = T_C - T_{STC} \quad (5.4)$$

T_C es la temperatura de la celda en condiciones de operación y T_{STC} es la temperatura bajo condiciones estándar ($25^\circ C$). Las perdidas en potencia asociadas a la temperatura ambiente y temperatura de operación de la tecnología fotovoltaica (TFV) están dadas por:

$$P_{LT} = C_{tmp} * \Delta_T \quad (5.5)$$

C_{tmp} es el coeficiente de perdidas en potencia por temperatura, dicho coeficiente es proporcionado por el fabricante de la tecnología fotovoltaica y Δ_T es la diferencia de temperaturas entre la celda o modulo fotovoltaico y la temperatura bajo condiciones estándar. Entonces el rendimiento térmico esta dado por:

$$R_T = 100 - P_{LT} \quad (5.6)$$

De tal forma que se obtiene el rendimiento térmico R_T expresado a manera de porcentaje.

Capítulo 6

Casos de estudio.

En este capítulo se describe brevemente la forma de operar de las rutas objeto de estudio. Se presenta también la metodología utilizada en este trabajo y se muestra la manera en la que se calculan los costos de la movilidad de combustión interna y de la movilidad eléctrica, las emisiones de CO₂, la generación de energía fotovoltaica y su impacto en la reducción de emisiones. En el capítulo se expone la forma en que se realiza el análisis económico que determina la viabilidad de la movilidad eléctrica y la propuesta de una flotilla 100 % eléctrica.

6.1. Servicio de Transporte Público Ruta Uno.

En la ciudad de Cuernavaca, varias empresas brindan servicios de transporte público urbano y suburbano cubriendo diversas rutas; dentro de estas, la RUTA UNO es la de mayor distancia recorrida, utiliza buses Mercedes Benz modelo Boxer 50 y se ha tomado como caso de estudio ya que tiene incidencia en el consumo de combustibles y emisiones contaminantes.

El servicio de transporte público inicia a las 6:00 hrs y termina a las 23:00 hrs, los vehículos salen en intervalos de 5 minutos. Hay dos estaciones denominadas estación A y estación B. La figura 6.1 es una imagen satelital de la ciudad de Cuernavaca; aquí, la línea roja ilustra el trayecto recorrido desde la estación A hasta la estación B por los buses de la RUTA UNO. Más adelante se presenta la viabilidad económica de la sustitución de los buses de Diesel por vehículos eléctricos en la Ruta UNO.

6.2. Ruta Gris Morelia.

En Morelia la población se desplaza principalmente en vehículos motorizados, dentro de los cuales el transporte público cubre casi el 55 % de ellos [40]. Este servicio lo brindan 15 líneas/rutas diferentes que se diferencian entre sí por números y colores. Se utilizan dos tipos de vehículos para brindar el servicio a la población, Nissan Urvan y Toyota Hiace. En este trabajo tomamos como caso de estudio la ruta conocida como RUTA GRIS. La ruta gris tiene dos ramales identificados como C y R, donde R denota “Realito” y C denota “Camelinas”. La ruta gris circula por una de las vías principales de la ciudad, y es una de las líneas que más desplazamientos realiza a lo largo del día, lo que repercute en el consumo de combustible y en las emisiones contaminantes. El servicio de transporte público está disponible de 6:00 hrs a 23:00 hrs, los vehículos salen en intervalos de 3 minutos. La figura 6.2 es una imagen satelital de la ciudad de Morelia, la línea roja indica el recorrido realizado por los vehículos de la ruta gris.

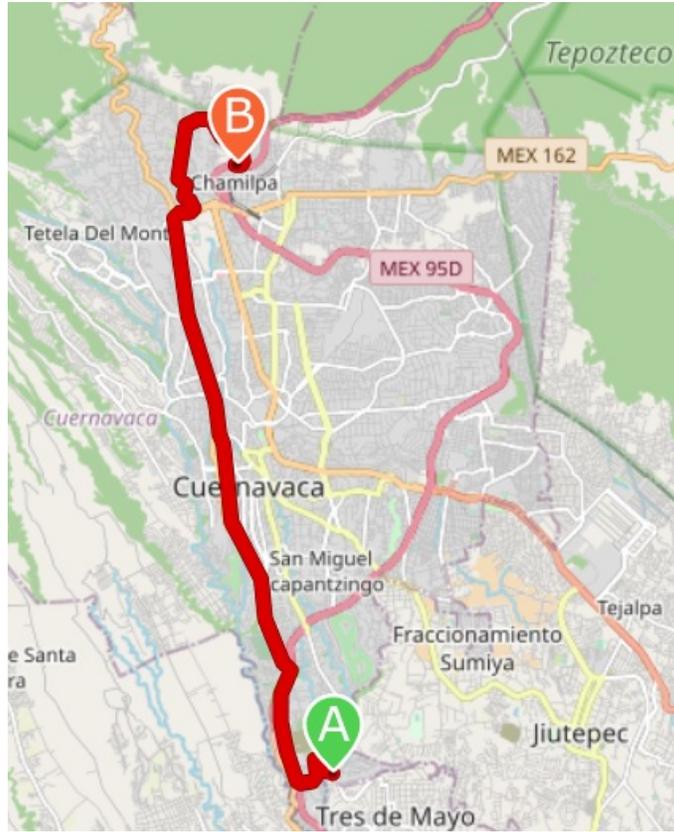


Figura 6.1: Trayecto Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. (Imagen tomada de www.openstreetmap.org y modificada por el autor)

La tabla 6.1, contiene información sobre distancias y tiempos de traslado de las rutas de ambas ciudades.

Ruta	Distancia traslado (km)	Tiempo traslado (min)	Gap (min)	Distancia (km)
Camelinas	30	60	3	510
Realito	30	60	3	510
Ruta Uno	20	70	5	160

Tabla 6.1: Tiempos y distancias de la rutas en un día típico de trabajo.

6.3. Metodología.

En este trabajo, se analiza la posibilidad de transitar hacia un sistema de transporte público basado en movilidad eléctrica. Para ello, se siguió la metodología mostrada en la figura 6.3. En primer lugar se identificaron los tipos de vehículos de combustión interna que son utilizados para proveer el servicio de transporte y se calcularon los costos de combustible. Una vez identificados los requerimientos de movilidad, se busco y seleccionó vehículos eléctricos alternativos que pudieran reemplazar a los vehículos de combustión interna actuales. Posteriormente, se determinó la demanda de energía eléctrica y los costos por kilometro con los VEs seleccionados. También fue propuesta

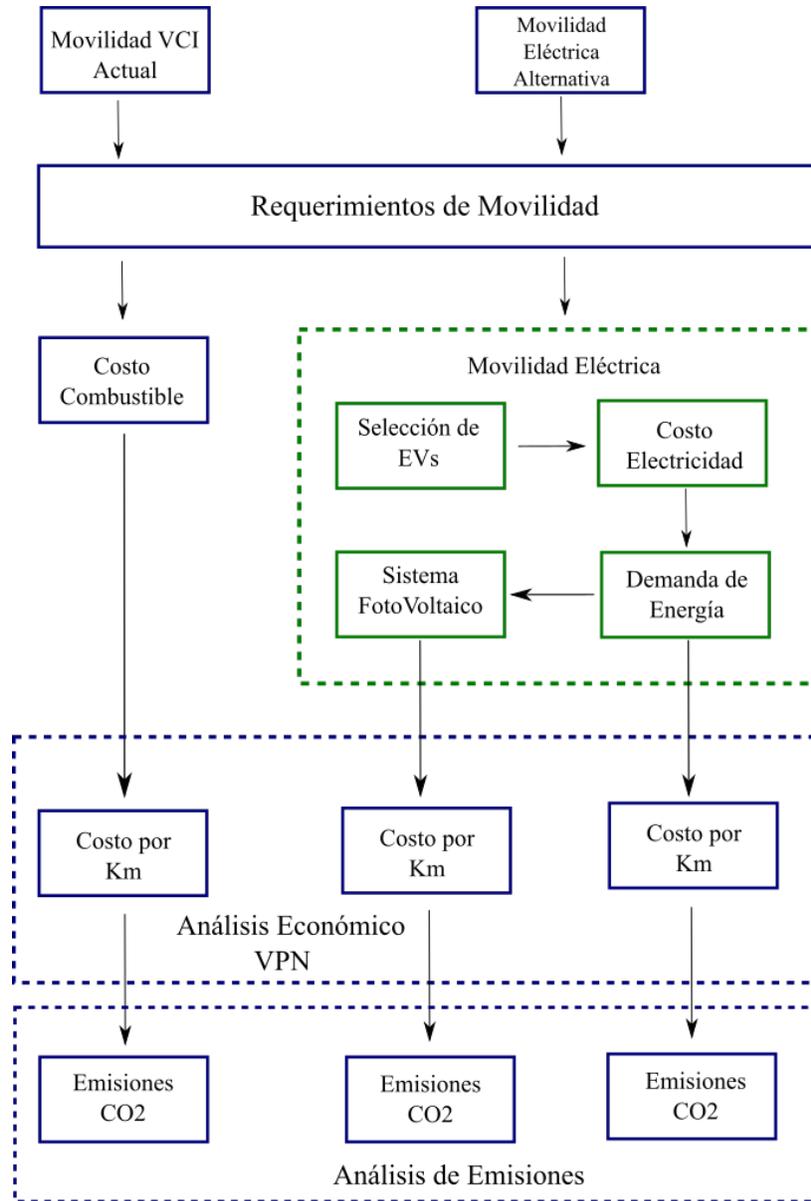


Figura 6.3: El diagrama ilustra la metodología de este trabajo.

6.4. Costos Movilidad Combustión Interna.

El costo del combustible está determinado por el precio del combustible, la distancia recorrida y el rendimiento de los vehículos. Los precios de los combustibles en México están regulados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Hay dos tipos de gasolina en México: Magna y Premium. La gasolina Magna es la más utilizada por los conductores, sobre todo en el transporte público, porque es más económica que la Premium. La gasolina Magna es equivalente a la Regular sin plomo y la gasolina Premium es similar a la Premium en el mercado internacional. Su principal característica es su nivel de octanaje: Premium tiene 92 octanos y Magna tiene 87 octanos. El costo por kilómetro en un vehículo de combustión interna (VCI) viene dado por la ecuación **6.1**.

$$C_{Km} = \frac{F_p}{P_i}, \quad (6.1)$$

donde C_{km} es el costo por km, expresado en USD/km, F_p es el precio del combustible, P_i denota el rendimiento del vehículo ($i = N$ para Nissan, $i = T$ para Toyota y $i = Mb$ para Mercedes Benz) expresado en kilometros por litro (km/l). La tabla 6.2 contiene los precios de los combustibles y los rendimientos de los vehículos utilizados para calcular los costos de movilidad de combustión interna.

Combustible	Precio combustible (MXN/l)	Vehículo	Rendimiento Vehículo (km/l)
Gasolina Premium	\$21.35	Toyota Hiace	6.7
Gasolina Magna	\$19.81	Nissan Urvan	7.1
Diesel	\$20.77	Mercedes Benz Boxer	2.8

Tabla 6.2: Parametros para determinar costos de combustible.

6.4.1. Costo Total.

De acuerdo a la información proporcionada por los administradores de la ruta gris en Morelia y la ruta uno en Cuernavaca, cada tres meses se realizan servicios "menores" de mantenimiento a los vehículos. Estos servicios consisten en un mantenimiento preventivo y constan de cambio de lubricante, filtros, bujías etc. El costo promedio típico de estos servicios ronda los \$180 USD para las vagonetas Toyota, \$155 USD para las vagonetas Nissan y \$250 USD para los camiones a Diesel Mercedes Benz. Estos costos de mantenimiento se agregan a los costos de combustible, de tal manera que los costos anuales están dados por la ecuación 6.2.

$$CAT = C_M + C_{A_n} \quad (6.2)$$

donde CAT el Costo Anual Total, C_M el costo anual asociado al mantenimiento del vehículo, C_{A_n} es el costo anual de combustible en USD.

6.5. Costos movilidad eléctrica.

Para determinar el costo por kilometro recorrido con un vehículo eléctrico es necesario conocer su rendimiento eléctrico, y el precio de la energía suministrada al vehículo. Los vehículos eléctricos tienen menos partes móviles que los vehículos de combustión interna, el tren de potencia de un VE es mucho más simple, los EV no requieren de cambios de aceite, reemplazos de filtros o bujías, por lo tanto, los costos de mantenimiento de un EV son un 20 % a un 30 % más baratos en comparación con un VCI [41]. El rendimiento eléctrico se puede definir como la cantidad de energía que utiliza el vehículo para recorrer un kilómetro.

$$R_{elec} = \frac{C_B}{Aut} \quad (6.3)$$

R_{elec} representa el rendimiento eléctrico del vehículo eléctrico, expresado en kWh/km. C_B es la cantidad de energía dispuesta en el banco de baterías del vehículo, expresada en kWh, y Aut es la autonomía del vehículo, es decir, la cantidad de kilómetros que puede viajar el vehículo con una sola

carga de energía. El costo por kilometro de un vehículo eléctrico depende de su rendimiento y del precio de la energía eléctrica y en la ecuación 6.4 se describe el mismo.

$$C_{km_{elec}} = R_{elec} \times P_{ener} \tag{6.4}$$

En la ecuación 6.4 $C_{km_{elec}}$ representa el costo por kilometro en un vehículo eléctrico, expresado en \$USD/km. R_{elec} denota el rendimiento eléctrico del VE en kWh/km y P_{ener} es el costo de la energía eléctrica proporcionada por el suministrador (C.F.E) en \$USD/kWh.

6.6. Búsqueda y selección de vehículos eléctricos

Se llevó a cabo una investigación sobre la oferta comercial disponible de vehículos eléctricos que pudieran sustituir a las unidades de combustión interna que prestan el servicio actualmente. Fueron seleccionados dos tipos de vehículos eléctricos manufacturados por la compañía china rockrich international [42], la figura 6.4 muestra la vagoneta eléctrica seleccionada para la ciudad de Morelia [43] cuyas dimensiones son similares a las vagonetas de combustión interna que actualmente proporcionan el servicio de transporte público, mientras que, para la ciudad de Cuernavaca, se optó por un Bus eléctrico[44] el cual se muestra en la figura 6.5. A partir de sus características fue elaborado un análisis económico y de emisiones de CO₂ con el fin de realizar una comparación con los vehículos de combustión interna. La tabla 6.3 contiene las algunas características de los vehículos eléctricos seleccionados.

Ciudad	Vehículo	Batería	Autonomía	Precio
Morelia	E5	88 kWh	300 km	\$45,000 USD
Cuernavaca	Haojing Bus	60 kWh	250 km	\$68,000 USD

Tabla 6.3: Características VEs seleccionados.



Figura 6.4: Vagoneta eléctrica seleccionada para la ciudad de Morelia, Michoacán. (Imagen tomada de www.rockrich.com.cn)



Figura 6.5: Camión eléctrico seleccionado para la ciudad de Cuernavaca, Morelos. (Imagen tomada de www.rockrich.com.cn)

6.7. Demanda Energética.

La cantidad de energía requerida por los vehículos eléctricos propuestos se calcula a partir de la ecuación 6.5.

$$D_E = \frac{1}{R_{elec}} \times D \times N_{EV} \quad (6.5)$$

En la ecuación anterior D_E representa la demanda de energía de los vehículos eléctricos expresada en kWh, R_{elec} es el rendimiento de los vehículos eléctricos en kWh/km y D es la distancia recorrida por el vehículo eléctrico, sus unidades son los kilómetros (km). N_{EV} es la cantidad de vehículos que integran la flota de las rutas de transporte público.

6.8. Generación de Energía Fotovoltaica.

Considerando las características reales del terreno de los espacios disponibles en las terminales de ambas rutas, se estableció como la mejor alternativa considerar arreglos fotovoltaicos compuestos por dos y tres módulos fotovoltaicos colocados en posición vertical y horizontal, teniendo una capacidad de 1,104 piezas en la ciudad de Morelia y 809 paneles fotovoltaicos en la ciudad de Cuernavaca. El módulo fotovoltaico seleccionado fue un panel monocristalino de la marca LG modelo NeONRLG cuya potencia pico es de 370W [45]. De tal manera, que la potencia máxima de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red para Morelia y Cuernavaca es de 408.5kWp y 298 kWp, respectivamente. La figura 6.6 es una representación esquemática del sistema fotovoltaico que podría ser instalado en la superficie disponible de la RUTA GRIS en la ciudad de Morelia, donde los rectángulos azules representan los arreglos de módulos fotovoltaicos. En las figuras 6.7 y 6.8 se muestran los sistemas fotovoltaicos propuestos para la ciudad de Cuernavaca.

Usando las ecuaciones descritas en la sección 8.2, y considerando el recurso solar provisto por la NASA [46], calculamos la posible generación de energía de los sistemas fotovoltaicos propuestos. La producción de energía para cada ciudad se muestra en la tabla 6.4.



Figura 6.6: Esquema sistema fotovoltaico en las instalaciones de la Ruta Gris en la ciudad de Morelia.

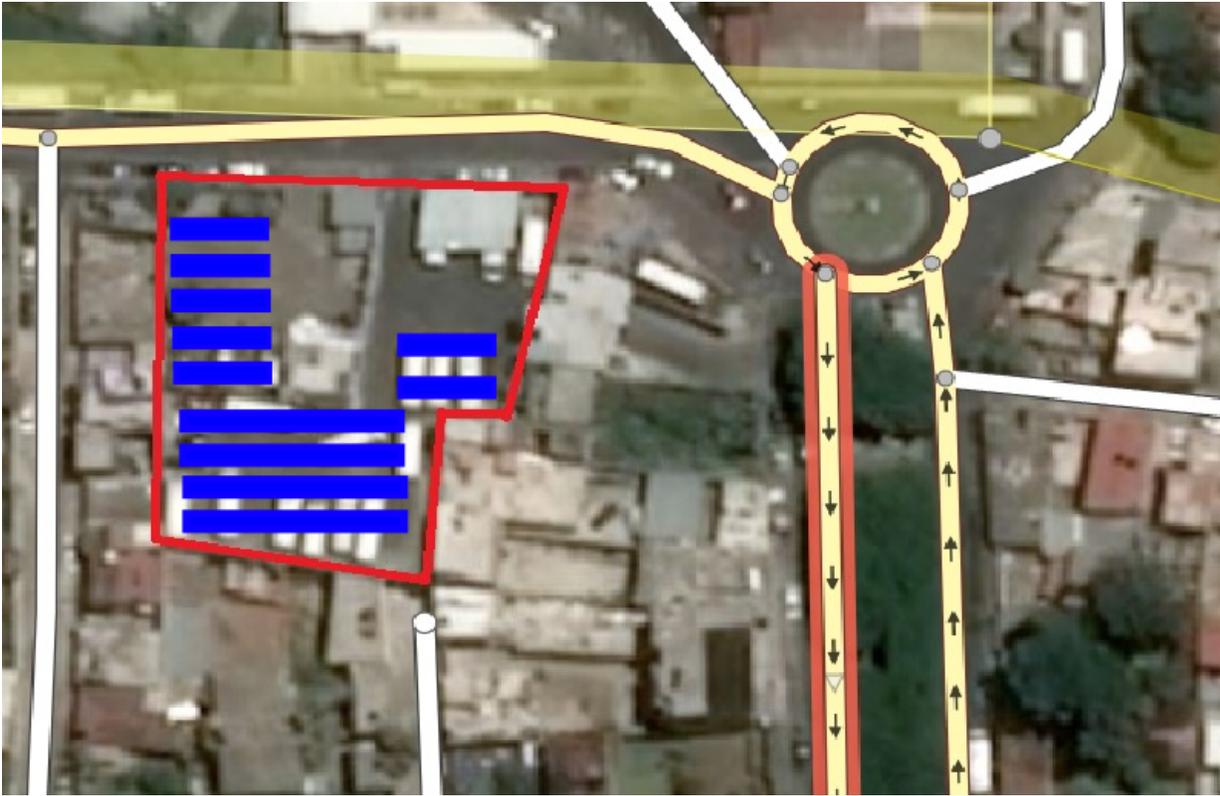


Figura 6.7: Sistema fotovoltaico en la terminal de la Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca.

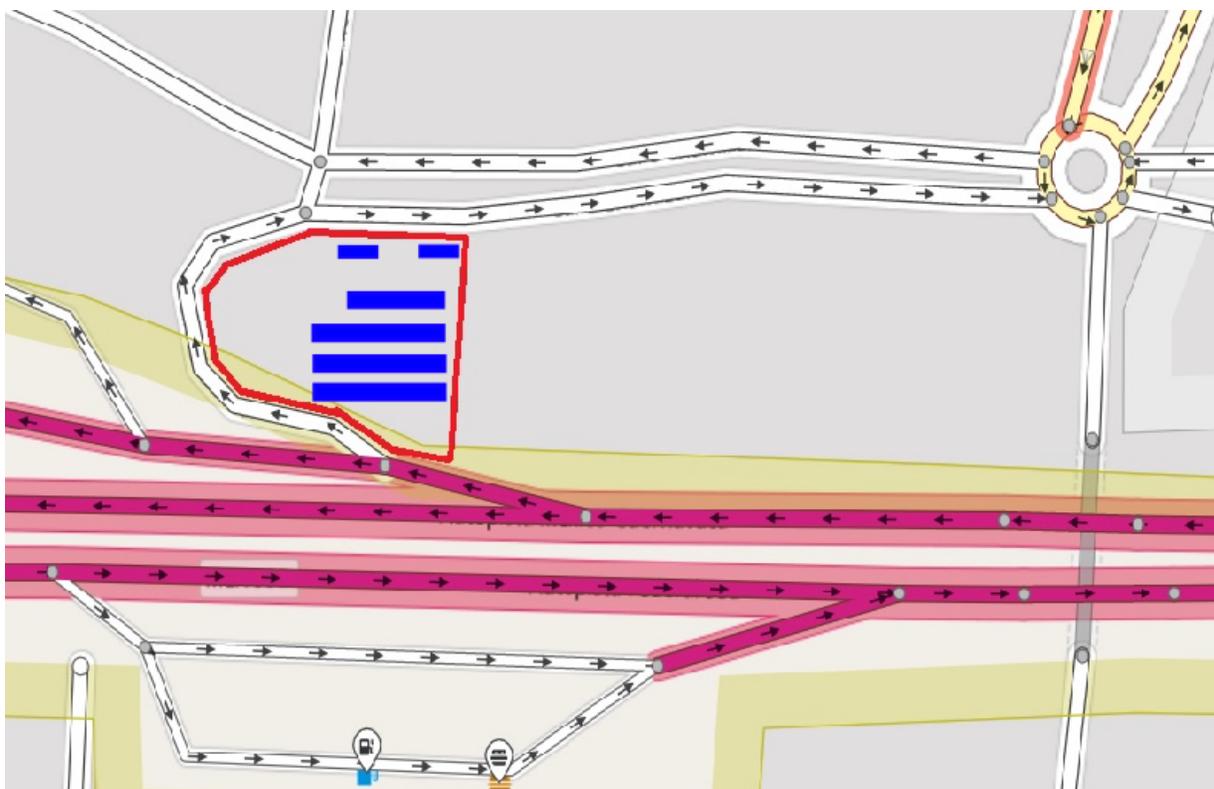


Figura 6.8: Sistema fotovoltaico en un predio usado por la Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca.

En la ciudad de Morelia, el período de mayor generación es de Marzo a Mayo; la menor producción de energía tiene lugar en Septiembre y Enero. A diferencia de la ciudad de Morelia, el sistema fotovoltaico ubicado en la ciudad de Cuernavaca tiene una generación de energía más uniforme durante todo el año. En el mes de Marzo se tendría la mayor generación de energía. Los sistemas fotovoltaicos ubicados en las ciudades de Morelia y Cuernavaca producirían al año alrededor de 589.5 MWh y 566.6 MWh respectivamente, esta energía podría reducir la demanda de energía proveniente de la red.

6.9. Emisiones de CO_2 .

En este trabajo se han estimado las emisiones de CO_2 asociadas al servicio de transporte público en las ciudades caso de estudio. Para ello se ha empleado la metodología propuesta por el IPCC [47]. Posteriormente establecemos escenarios y comparamos emisiones por la operación de los vehículos eléctricos propuestos. En este análisis han sido considerados los factores de emisión de la gasolina y el diesel, provistos por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) [48] y el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [49] el cual es proporcionado por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). La tabla 6.5 contiene los valores de los factores de emisión.

Mes	Morelia			Cuernavaca		
	Recurso Solar (HSP)	Temp. Amb (°C)	PV (MWh)	Recurso Solar (HSP)	Temp. Amb (°C)	PV (MWh)
Enero	3.4	26	36.52	6.28	28.3	48.84
Febrero	5.16	28.2	49.56	6.93	31.3	48.02
Marzo	5.66	31.8	59.22	7.31	33.5	55.52
Abril	6.3	32.6	63.55	6.85	33.9	50.25
Mayo	5.88	32.9	61.21	6.15	33.9	46.62
Junio	4.83	29.4	49.44	6.03	33.9	45.05
Julio	4.41	29.4	46.64	6.27	28.7	48.67
Agosto	4.29	28.8	45.50	5.69	29.3	44.05
Septiembre	4.41	28.6	42.53	5.46	28.7	41.02
Octubre	4.16	28.3	44.22	5.84	27.6	45.56
Noviembre	4.49	26.9	46.48	6.23	27.8	46.99
Diciembre	4.16	26.2	44.64	4.16	26.2	46.32

Tabla 6.4: Generación de energía mensual de los sistemas fotovoltaicos propuestos en ambas ciudades.

Factores de Emisión CO ₂			
Premium	Magna	Diesel	Electricidad
2.304	2.344	2.599	0.582

Tabla 6.5: Factores de emisión de CO₂ para los distintos tipos de combustible. Para las gasolinas Magna y Premium las unidades son (kgCO₂/l) para electricidad es (TON CO₂/MWh).

Para determinar las emisiones de CO₂ asociadas con el uso del transporte público en la ciudad de Morelia y Cuernavaca se han considerado los rendimientos de los vehículos de combustión interna empleados para tal fin, los cuales son mostrados en la tabla 6.6.

Rendimiento Vehículos de Combustión Interna		
Nissan Urvan	Toyota Hiace	Mercedes Benz Boxer
0.140	0.149	0.353

Tabla 6.6: Rendimientos de los VCI utilizados por las rutas de transporte público en las ciudades caso de estudio. El rendimiento esta expresado en litros por kilómetro.

De tal manera que las emisiones de CO₂ se calculan a partir de la siguiente expresión de la ecuación 6.6.

$$E_{VCI} = D \times R \times FE \quad (6.6)$$

E_{VCI} son las emisiones de CO₂, R denota el rendimiento del vehículo expresado en litros por kilometro, D es la distancia recorrida por el VCI expresada en kilómetros y FE corresponde al factor de emisión del tipo de combustible empleado por el VCI. Las emisiones de los vehículos eléctricos debido a la generación de electricidad para su operación se calculan con la ecuación 6.7.

$$E_{VE} = D_E \times FE_{SEN}. \quad (6.7)$$

En esta expresión E_{VE} representa las emisiones de CO₂ asociadas al uso de los vehículos eléctricos, D_E es la demanda de energía del VE expresada en MWh y FE_{SEN} es el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional expresado en TON CO₂/MWh.

6.9.1. Disminución de emisiones.

En esta sección, se analiza la reducción de emisiones de CO₂ que tendría lugar por el uso de la energía solar fotovoltaica y los vehículos eléctricos. Los sistemas fotovoltaicos propuestos producirían una fracción de energía renovable de la energía requerida por los vehículos eléctricos.

$$F_R = \frac{E_{FV}}{D_E}. \quad (6.8)$$

En la ecuación 6.8 F_R representa la fracción de energía renovable aportada por los sistemas fotovoltaicos, E_{FV} denota la energía generada durante un año por los sistemas fotovoltaicos propuestos expresada en MWh y D_E es la demanda energética anual de los vehículos eléctricos en MWh. De tal manera que, las emisiones de CO₂ considerando el uso de energía solar se determinan a partir de la ecuación 6.9.

$$E_{EV-RED-FV} = E_{VE} - [F_R \times E_{VE}] \quad (6.9)$$

En la ecuación 6.9 $E_{EV-RED-FV}$ son las emisiones de CO₂ considerando el aporte de energía de los sistemas fotovoltaicos, E_{VE} son las emisiones generadas por el uso de energía eléctrica proveniente de la RED y F_R es la fracción de energía renovable generada con la tecnología fotovoltaica.

6.10. Análisis Económico.

En este trabajo, se ha realizado un análisis económico que compara los costos de la movilidad actual basada en combustión interna, contra una propuesta de movilidad eléctrica. Se han establecido y evaluado dos escenarios considerando sistemas de transporte eléctricos. El primer escenario contempla el uso de la energía eléctrica proveniente de la RED (RED-EV). El segundo escenario involucra la aportación de energía de origen renovable de los sistemas fotovoltaicos propuestos (RED-EV-FV). A través de la herramienta financiera del Valor Presente Neto (VPN) se ha determinado la viabilidad de cada escenario, el VPN se calcula de acuerdo a la ecuación 6.10.

$$VPN = \frac{CAT[(1+i)^n - 1]}{i(1+i)^n} \quad (6.10)$$

En **6.10** CAT es el costo total anualizado, i corresponde a la tasa de interés anual y n representa el numero de años del proyecto, para este trabajo se ha considerado $n=25$. En el análisis económico

ha sido considerado el costo de los vehículos eléctricos, los costos de la energía eléctrica, los costos en combustible, el precio de la tecnología fotovoltaica [5], la energía aportada por los sistemas fotovoltaicos y el costo de reemplazo de las baterías de los vehículos eléctricos [50].

6.11. Estrategia operativa con vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos, a diferencia de los vehículos de combustión interna cuya autonomía no es finita, tienen la característica de tener una conducción limitada por la energía dispuesta en sus baterías (autonomía). Por esta razón, es necesario crear una estrategia operativa efectiva que permita proporcionar el servicio de transporte público sin interrupciones ni alteraciones en la prestación del servicio.

Considerando el tiempo total de traslado de los vehículos, así como el gap existente entre cada camión y vagoneta, es posible determinar la cantidad mínima de vehículos de combustión interna necesarios para proporcionar el servicio de transporte público; la cual se expresa en la ecuación 6.11.

$$N_{VCI} = \frac{T_{tr}}{gap} + 1 \quad (6.11)$$

Donde N_{VCI} es el número mínimo de vehículos de combustión interna necesarios para proporcionar el servicio de transporte público, T_{tr} es el tiempo que le toma al vehículo realizar el traslado desde el origen hasta el destino, gap es el tiempo que existe entre la salida de la base de cada vehículo.

La autonomía de un VE después de recorrer cierta distancia esta dada mediante la ecuación 6.12.

$$Aut_j = Aut_{MAXj} - \Sigma VE_{Dj} \quad (6.12)$$

Donde Aut_{MAX} es el limite superior de autonomía hasta la próxima recarga de energía y ΣVE_{Dj} es la sumatoria de la distancia recorrida por el VE.

La cantidad de VE adicionales requeridos se puede determinar por la ecuación 6.13.

$$VE_{AD} = \frac{T_{ch}}{gap} \quad (6.13)$$

Donde T_{ch} es el tiempo de carga del VE y el gap es el tiempo entre una nueva salida a ruta del VE. El tiempo de carga depende de la potencia eléctrica del cargador y de la cantidad de energía que debe ser suministrada a las baterías del VE; está dado por la ecuación 6.14.

$$T_{ch} = \frac{VE_D \times R_{elec}}{P_{ch} \times \eta_{elec}} \quad (6.14)$$

Donde VE_D es la distancia recorrida por el VE, R_{elec} es el rendimiento eléctrico del VE, y se refiere a la cantidad de energía eléctrica necesaria para recorrer un kilómetro, P_{ch} es la potencia eléctrica del cargador y η_{elec} es la eficiencia eléctrica del sistema de carga.

El número total de vehículos eléctricos esta dado por la ecuación 6.15.

$$N_{VE} = N_{ICV} + VE_{AD} \quad (6.15)$$

Donde N_{VE} es la cantidad total de vehículos eléctricos.

La energía demandada por los VEs está dada por la ecuación 6.16.

$$VE_C = B_i + \Sigma E_R t_{ch} \quad (6.16)$$

Donde B_i representa la cantidad de energía dispuesta en la batería al momento de la carga eléctrica, E_R es la energía proveniente de la RED que carga la batería del VE durante un cierto tiempo t_{ch} .

El costo de la carga eléctrica de los VE depende directamente del precio de la energía proveniente de la RED. Así mismo, el precio de la electricidad suministrada por el proveedor (CFE) varía en función de las horas del día ($P_{Ei,j,k}$). La aportación de la energía generada por el sistema fotovoltaico propuesto (E_{SFV}) disminuye en un porcentaje la demanda de energía importada de la RED y en consecuencia se reduce la facturación eléctrica. Se puede calcular con 6.17

$$C_E = [VE_R \times VE_D \times (VE_T - VE_{out})] \times [(P_{Ei,j,k}) - E_{SFV}] \quad (6.17)$$

Donde C_E es el costo de la energía, VE_R es la energía consumida por cada kilómetro que recorre el VE, VE_D es la distancia que recorre el VE, la diferencia de la cantidad total de VEs menos los VEs que están en transito da la cantidad de VE que se están cargando en la base de operaciones de las rutas, $P_{Ei,j,k}$ indica el precio de la energía eléctrica de la RED y E_{SFV} es la energía generada por el sistema fotovoltaico.

Capítulo 7

Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados de este trabajo. Los costos de movilidad de combustión interna fueron calculados y comparados con los costos de la movilidad eléctrica. La energía requerida por los vehículos eléctricos propuestos fue determinada, se estimó la cantidad de energía que podría ser aportada por los sistemas fotovoltaicos planteados. Se calcularon las emisiones de CO₂ asociadas al uso de los vehículos de combustión interna y se contrastaron contra las emisiones de la movilidad eléctrica, considerando el uso de energía eléctrica proveniente de la red y con el aporte de energía fotovoltaica. Esta sección contiene los resultados del análisis económico realizado.

7.1. Costo movilidad combustión interna.

Utilizando la ecuación 6.1, los precios de combustible y los rendimientos de los vehículos utilizados para proporcionar a la población el servicio de transporte público de la tabla 6.2, se ha determinado el costo de combustibles. La tabla 7.1 contiene el costo que representa recorrer un kilómetro utilizando combustibles fósiles. En la figura 7.1 se muestran de manera gráfica los costos anuales en combustible para cada tipo de vehículo, TYTp, TYTm, NSp, NSm y MBd denotan Toyota premium, Toyota magna, Nissan premium, Nissan magna y Mercedes Benz Diesel respectivamente. Para el caso de la ciudad de Morelia los costos promedios de combustible rondan los \$550,000 MXN anuales. Conducir una vagoneta Toyota modelo Hiace utilizando gasolina premium representa un costo anual de \$592,000 MXN, la prestación del servicio usando una vagoneta Nissan utilizando gasolina magna tiene un costo anual de \$516,000 MXN. Para la ciudad de Cuernavaca, el uso del camión a Diesel Mercedes Benz tiene un costo anual en combustible de \$424,000 MXN.

Vehículo	Combustible	Precio combustible (MXN/l)	Rendimiento (l/km)	Costo (MXN/km)
Toyota	Gasolina Magna	\$19.81	0.149	\$2.89
Toyota	Gasolina Premium	\$21.35	0.149	\$3.27
Nissan	Gasolina Magna	\$19.81	0.140	\$2.69
Nissan	Gasolina Premium	\$21.35	0.140	\$3.08
Mercedes Benz	Diesel	\$20.77	0.353	\$7.33

Tabla 7.1: Costo por kilómetro movilidad combustión interna.

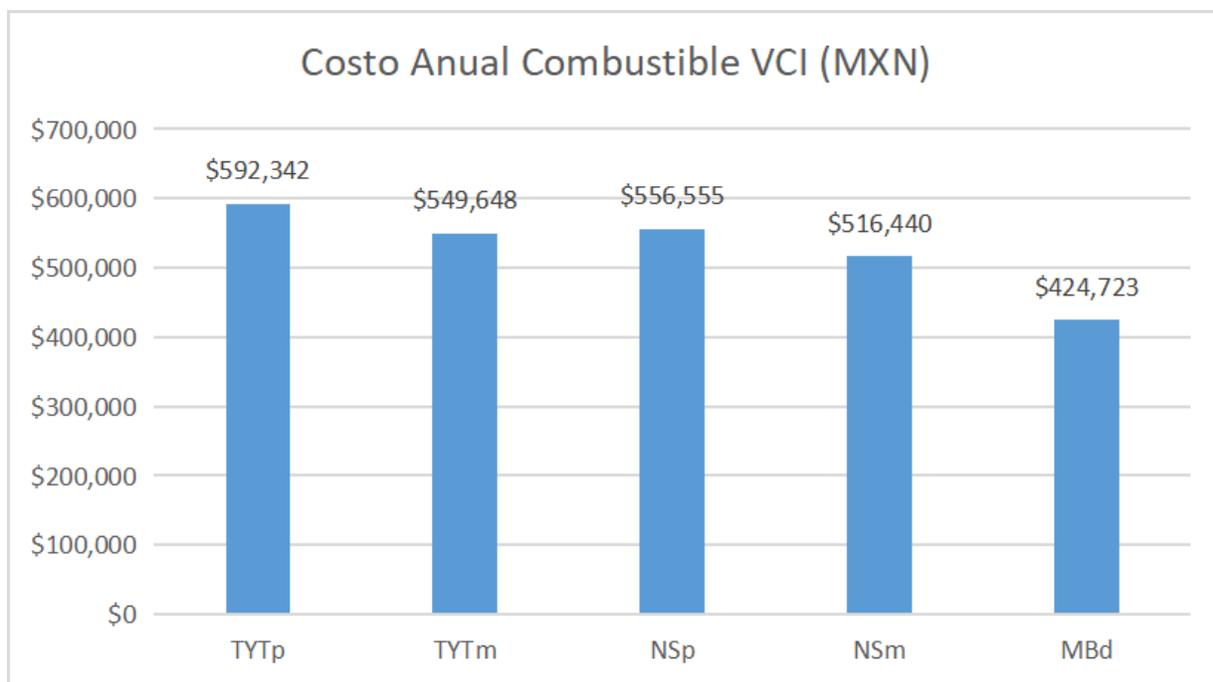


Figura 7.1: Costo anual combustible por tipo de vehículo, Morelia y Cuernavaca.

7.2. Comparación costos movilidad eléctrica vs combustión interna.

Los costos asociados a la movilidad eléctrica han sido calculados con la ecuación 6.4, se consideraron los precios de la electricidad emitidos por la C.F.E y las características operativas de las rutas descritas en la tabla 6.1. Una vez determinados dichos costos, se procedió a realizar una comparación entre la movilidad actual basada en combustión interna y la propuesta de movilidad eléctrica. La tabla 7.2 muestra los costos por kilómetro utilizando vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos propuestos en este trabajo. La figura 7.2 muestra de manera gráfica una comparación entre los costos anuales entre la movilidad actual y la movilidad eléctrica propuesta.

Vehículo	Combustible	Costo (MXN/km)
Toyota	Magna	\$2.89
Toyota	Premium	\$3.27
Nissan	Magna	\$2.69
Nissan	Premium	\$3.08
Mercedes Benz	Diesel	\$7.33
VE Van E5	Electricidad	\$0.40
Ebus Haojing	Electricidad	\$0.33

Tabla 7.2: Comparación costos por kilómetro movilidad combustión interna vs movilidad eléctrica.

Esta comparación muestra los beneficios económicos de la movilidad eléctrica. El costo por kilómetro utilizando la vagoneta eléctrica E5 y el camión eléctrico Ebus Haojing es mucho más barato que usar cualquiera de los vehículos de combustión interna actuales. De acuerdo a los resultados tanto

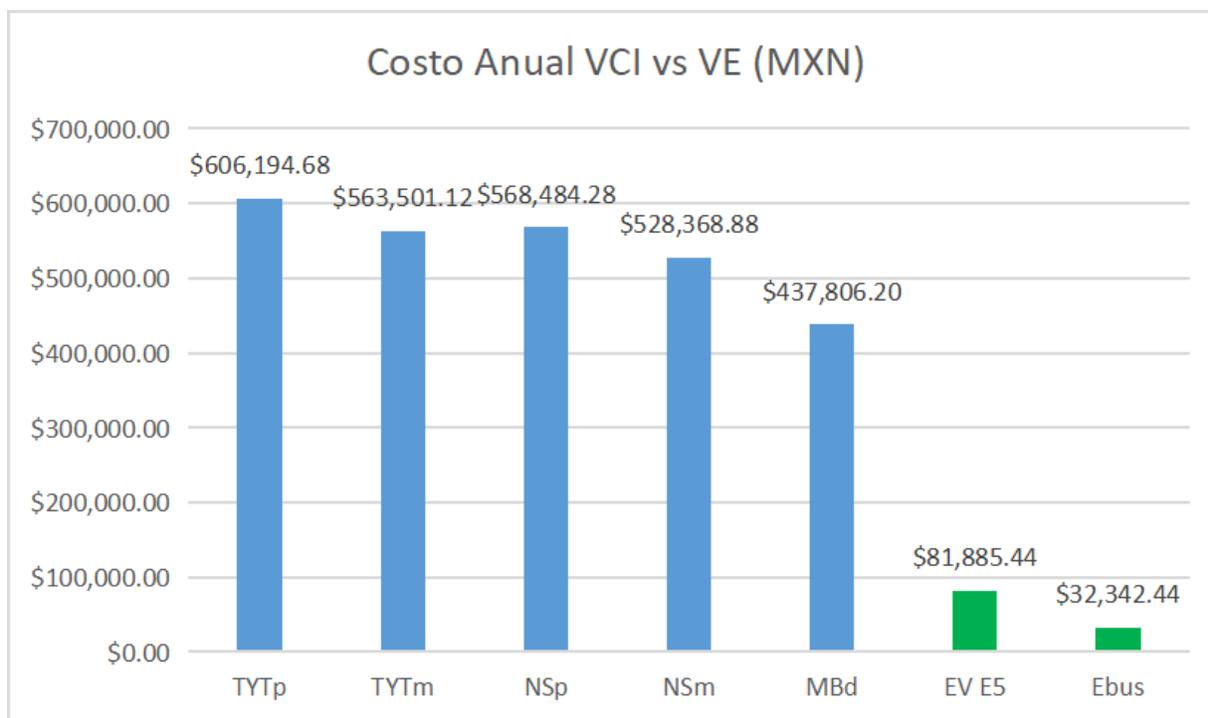


Figura 7.2: Comparación costo anual movilidad combustión interna vs movilidad eléctrica.

la ruta gris en Morelia, como la Ruta Uno en Cuernavaca podrían generar ahorros significativos en costo de combustible y mantenimiento.

7.3. Demanda energética movilidad eléctrica.

Utilizando la ecuación 6.5, tomando en cuenta las condiciones operativas del servicio de transporte público de la ciudad de Morelia y Cuernavaca, así como las características de los vehículos eléctricos seleccionados, se calculó la cantidad de energía requerida para satisfacer la demanda del servicio de transporte. La ruta gris, en la ciudad de Morelia, opera con 42 vagonetas de combustión interna, recorriendo diariamente 21,420 km. Para cubrir esa cantidad de kilómetros, el vehículo eléctrico requiere 145kWh, lo que representaría una demanda energética anual de 2,293MWh. En la ciudad de Cuernavaca, la Ruta Uno utiliza 76 camiones a Diesel para brindar el servicio de transporte, cada camión viaja al día 160 kilómetros, esa cantidad de kilómetros representa una demanda de energía de 1,065MWh anuales. En la tabla 7.3 se presentan los requerimientos de energía.

Ciudad	Vehículo Eléctrico	Distancia (km)	Rendimiento VE (kWh)	Energía Anual (MWh)
Morelia	Van E5	21,420	0.29	2,293
Cuernavaca	Ebus	12,160	0.24	1,065

Tabla 7.3: Demanda anual de energía de los vehículos eléctricos seleccionados.

7.3.1. Aporte fotovoltaico.

La ciudad de Cuernavaca, cuenta con un recurso solar de $6\text{kWh}/\text{m}^2$ y una temperatura ambiente promedio anual de 33°C . Considerando estas condiciones climatológicas se calculó la generación de energía del sistema fotovoltaico (SFV) propuesto. La figura 7.3 muestra la generación mensual de energía de dicho sistema. Anualmente, el SFV produciría 566MWh , lo que representa un aporte del 53% de la demanda de energía de los vehículos eléctricos. En la ciudad de Morelia el recurso solar disponible es de $4\text{kWh}/\text{m}^2$, Morelia tiene un clima templado con una temperatura promedio anual de 28°C . Bajo estas condiciones climatológicas, el SFV propuesto para la Ruta Gris produciría anualmente al rededor de 589MWh , esta energía contribuye con un 26% a la demanda energética que sería suministrada por el proveedor (CFE). La figura 7.4 contiene de manera gráfica la generación mensual de energía del SFV propuesto para la ciudad de Morelia.

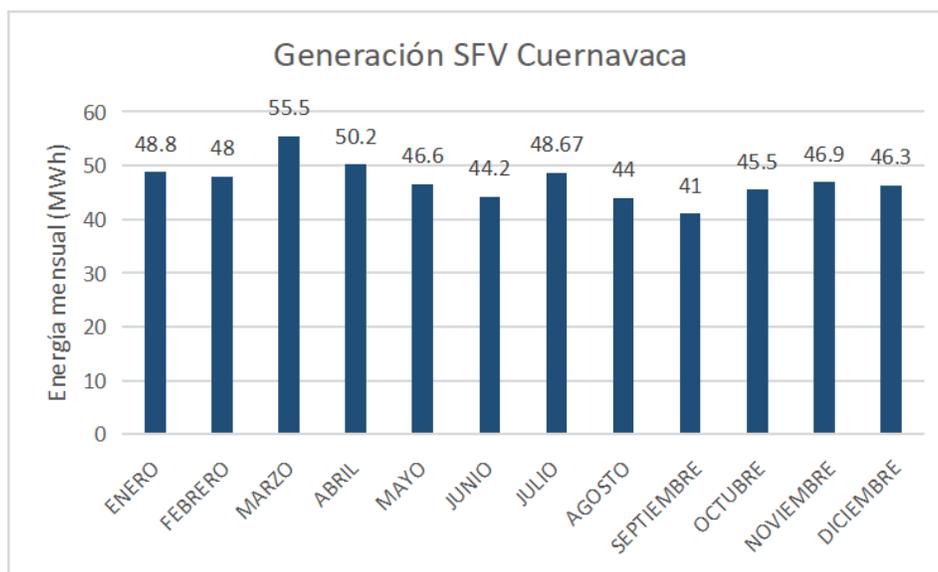


Figura 7.3: Generación de energía mensual SFV Cuernavaca.

7.4. Emisiones de CO₂.

Fueron estimadas las emisiones de CO₂ producidas por el uso de los vehículos de combustión interna (VCI) que prestan el servicio de transporte público actualmente. También han sido calculadas las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de energía para abastecer a los vehículos eléctricos. Por ultimo, se calculan la emisiones de CO₂ considerando la fracción de energía renovable generada por los sistemas fotovoltaicos propuestos. Los resultados se muestran en la tabla 7.4.

				Morelia		Cuernavaca		
NSm	NSp	TYTm	TYTp	VE-RED	VE-RED-SFV	MBd	Ebus-RED	Ebus-RED-SFV
2,565	2,521	2,730	2,684	1,355	991	4,023	619	290

Tabla 7.4: Emisiones anuales de CO₂ (en TON) movilidad combustión interna, movilidad eléctrica con energía totalmente proveniente de la RED y movilidad eléctrica con energía fotovoltaica.

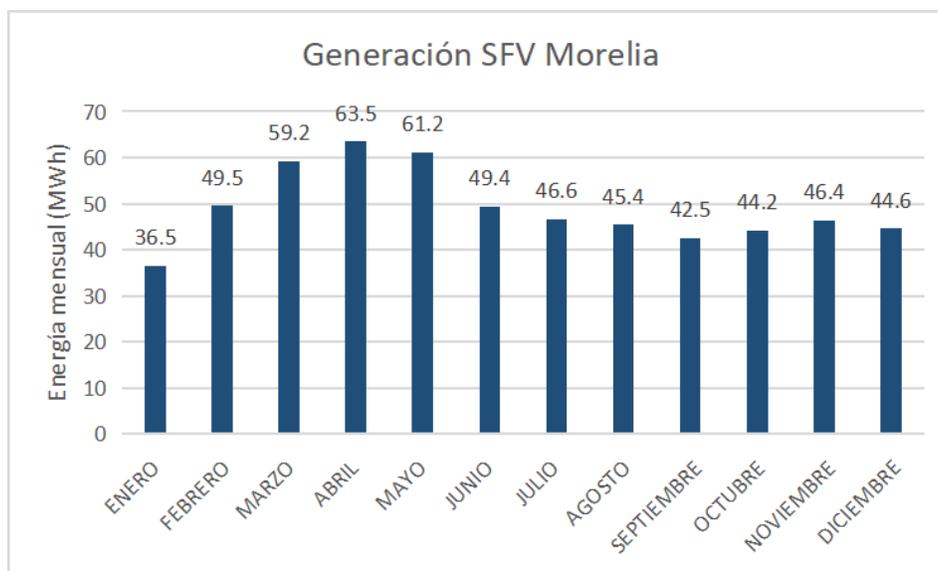


Figura 7.4: Generación de energía mensual SFV Morelia.

La figura 7.5 muestra para las ciudades caso de estudio las emisiones anuales de CO₂ de los vehículos de combustión interna con los combustibles utilizados actualmente. También muestra la emisiones considerando la sustitución de los VCI por VEs con suministro eléctrico únicamente de la RED, y considerando el aporte energético de los sistemas fotovoltaicos propuestos.

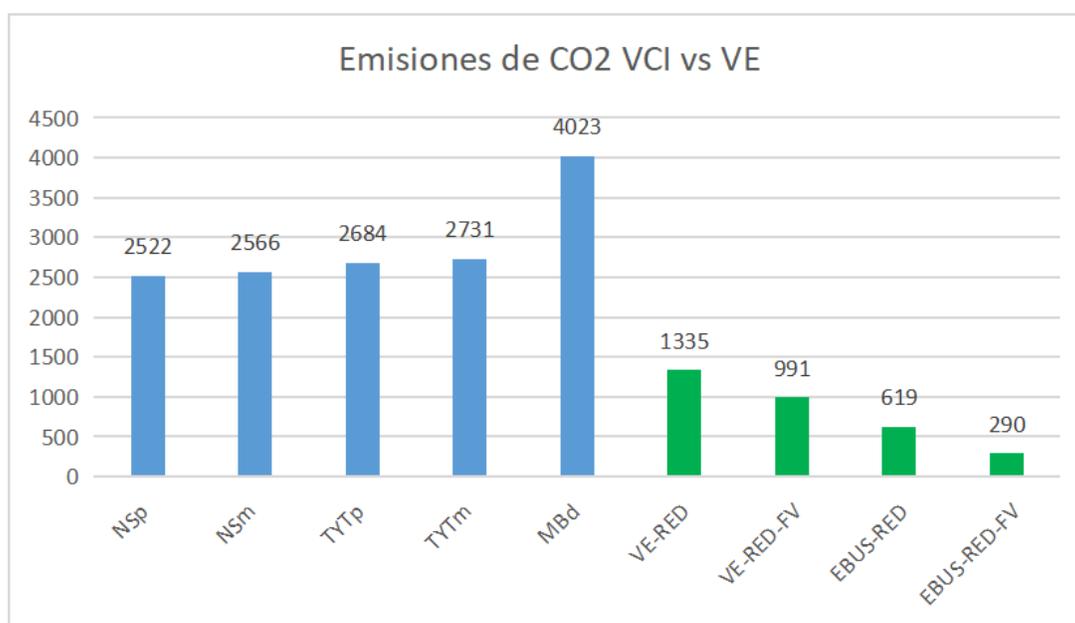


Figura 7.5: Emisiones anuales de CO₂

7.5. Análisis económico.

Se han establecido dos escenarios: movilidad eléctrica con energía provista completamente por el suministrador, este escenario se ha definido como RED-VE, el segundo escenario propuesto se

ha definido como RED-VE-SFV, en este escenario la energía generada por el sistema fotovoltaico se inyecta directamente a la RED, de tal manera que, la demanda de energía proveniente de la RED disminuye, en consecuencia los costos de energía también se reducen. En este trabajo hemos considerado que la RED es una fuente de energía y almacenamiento ilimitada. La tabla 7.5 contiene los elementos que fueron considerados para realizar el análisis económico.

Concepto	Morelia	Cuernavaca
Interés	10 %	10 %
Periodo	25 años	25 años
VCI costo (USD)	\$1,242,833	\$1,702,838
VE costo (USD)	\$1,890,000	\$5,168,00
Demanda de energía (MWh)	2,293	1,065
Costo de energía	\$310,050	\$154,337
Inversión SFV (USD)	\$604,580	\$441,040
Energía producida por SFV (MWh)	589.5	566

Tabla 7.5: Consideraciones en la evaluación económica.

Los resultados de la evaluación económica se muestran en la tabla 7.6 y en la figura 7.6.

Escenario	Morelia (VPN)	Cuernavaca (VPN)
RED-VE	19,969,949	48,311,069
RED-VE-SFV	22,449,322	49,909,184

Tabla 7.6: Evaluación Valor Presente Neto de los dos escenarios.

Ciudad	Costo VCI (USD)	Costo VE (USD)	VPN (VCI)	VPN (VE)
Morelia	30,000	45,000	171,000	186,000
Cuernavaca	35,000	68,000	160,000	193,000

Tabla 7.7: Valor presente neto de la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos.

La evaluación económica indica que la movilidad eléctrica en las dos ciudades caso de estudio es viable para los dos escenarios analizados. Sin embargo, queda pendiente un asunto que no es menor. La definición de las estrategias de la carga de los vehículos eléctrico es otro de los temas que deben ser visualizados y resueltos.

7.6. Propuesta de Estrategia Operativa.

El servicio de transporte público debe ser provisto de manera continua y sin interrupciones dentro del horario de trabajo de las rutas. En ese sentido, la autonomía de los vehículos eléctricos es un aspecto fundamental a considerar en la transición hacia la electromovilidad colectiva. Se debe

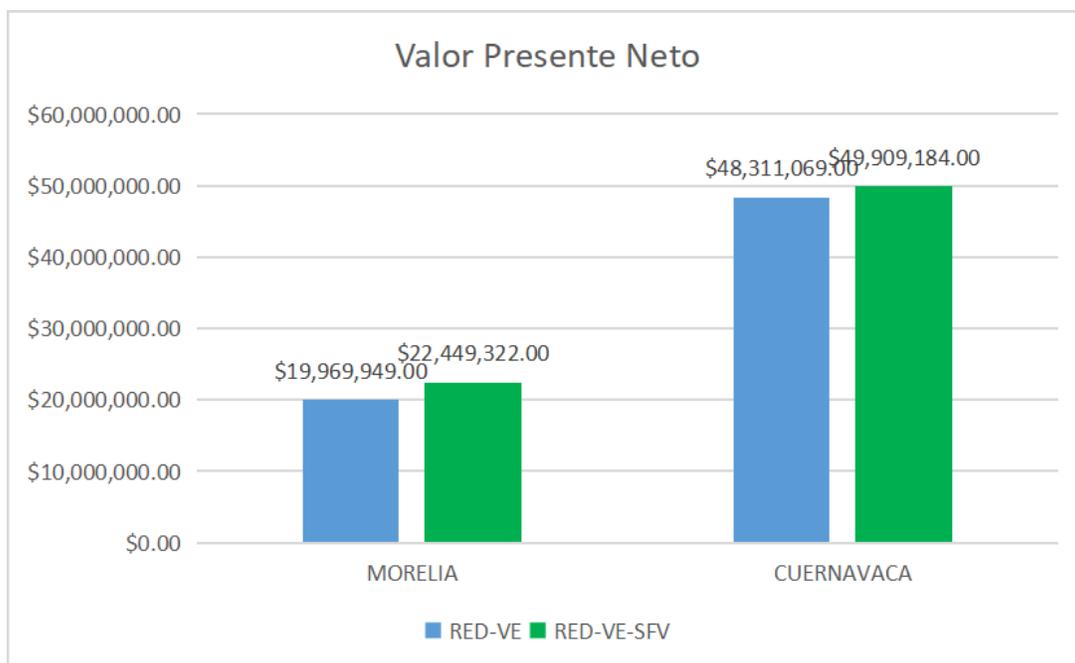


Figura 7.6: Evaluación económica de los dos escenarios.

considerar el tiempo asociado a la recarga de energía de las baterías de los vehículos eléctricos y sus posibles efectos en las salidas de cada vehículo para ofrecer el servicio. Así pues, se propuso una estrategia operativa que permitiera brindar el servicio de transporte público a la población sin alterar de manera significativa la operatividad actual de las rutas. Para ello, fue analizada la manera en la que la Ruta Gris y la Ruta Uno llevan a cabo sus actividades. La tabla 7.8 muestra la operación de las vagonetas de la Ruta Gris en un día típico de trabajo. La ruta gris comienza sus labores a las 6:00 horas, las vagonetas salen cada tres minutos, la ultima vagoneta sale de la terminal a las 22:15 horas, la letra R denota ramal Realito y la letra C representa ramal Camelinas.

SALIDA	VAG	LLEGADA										
6:00	1R,2C	9:03	1R,2C	12:06	1R,2C	15:09	1R,2C	18:12	1R,2C	21:15	1R,2C	23:15
6:03	3R,4C	9:06	3R,4C	12:09	3R,4C	15:12	3R,4C	18:15	3R,4C	21:18	3R,4C	23:18
6:06	5R,6C	9:09	5R,6C	12:12	5R,6C	15:15	5R,6C	18:18	5R,6C	21:21	5R,6C	23:21
6:09	7R,8C	9:12	7R,8C	12:15	7R,8C	15:18	7R,8C	18:21	7R,8C	21:24	7R,8C	23:24
6:12	9R,10C	9:15	9R,10C	12:18	9R,10C	15:21	9R,10C	18:24	9R,10C	21:27	9R,10C	23:27
6:15	11R,12C	9:18	11R,12C	12:21	11R,12C	15:24	11R,12C	18:27	11R,12C	21:30	11R,12C	23:30
6:18	13R,14C	9:21	13R,14C	12:24	13R,14C	15:27	13R,14C	18:30	13R,14C	21:33	13R,14C	23:33
6:21	15R,15C	9:24	15R,15C	12:27	15R,15C	15:30	15R,15C	18:33	15R,15C	21:36	15R,15C	23:36
6:24	17R,18	9:27	17R,18	12:30	17R,18	15:33	17R,18	18:36	17R,18	21:39	17R,18	23:39
6:27	19R,20C	9:30	19R,20C	12:33	19R,20C	15:36	19R,20C	18:39	19R,20C	21:42	19R,20C	23:42
6:30	21R,22C	9:33	21R,22C	12:36	21R,22C	15:39	21R,22C	18:42	21R,22C	21:45	21R,22C	23:45
6:33	23R,24C	9:36	23R,24C	12:39	23R,24C	15:42	23R,24C	18:45	23R,24C	21:48	23R,24C	23:48
6:36	25R,26C	9:39	25R,26C	12:42	25R,26C	15:45	25R,26C	18:48	25R,26C	21:51	25R,26C	23:51
6:39	27R,28C	9:42	27R,28C	12:45	27R,28C	15:48	27R,28C	18:51	27R,28C	21:54	27R,28C	23:54
6:42	29R,30C	9:45	29R,30C	12:48	29R,30C	15:51	29R,30C	18:54	29R,30C	21:57	29R,30C	23:57
6:45	31R,32C	9:48	31R,32C	12:51	31R,32C	15:54	31R,32C	18:57	31R,32C	22:00	31R,32C	23:00
6:48	33R,34C	9:51	33R,34C	12:54	33R,34C	15:57	33R,34C	19:00	33R,34C	22:03	33R,34C	23:03
6:51	35R,36C	9:54	35R,36C	12:57	35R,36C	16:00	35R,36C	19:03	35R,36C	22:06	35R,36C	23:06
6:54	37R,38C	9:57	37R,38C	13:00	37R,38C	16:03	37R,38C	19:06	37R,38C	22:09	37R,38C	23:09
6:57	39R,40C	10:00	39R,40C	13:03	39R,40C	16:06	39R,40C	19:09	39R,40C	22:12	39R,40C	23:12
7:00	41R,42C	10:03	41R,42C	13:06	41R,42C	16:09	41R,42C	19:12	41R,42C	22:15	41R,42C	23:15

Tabla 7.8: Día típico de operaciones de la Ruta Gris en la ciudad de Morelia.

La Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca, presta el servicio de transporte utilizando camiones a Diesel, en un horario de las 6:00 a las 22:00 horas, circula desde la base ubicada en las cercanías de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) hasta la base denominada Guacamayas, con una distancia aproximada de 20 kilómetros en un tiempo de 1 hora con 10 minutos. Las unidades salen de la base para realizar su trayecto cada 5 minutos. La tabla 7.7 contiene la información operativa de un día típico de la Ruta Uno.

CAMIÓN	RAMAL 1			CAMIÓN	RAMAL 2		
	SALE A	GAP	LLEGA B		SALE B	GAP	LLEGA A
1	6:00:00	0	7:10:00	39	6:00:00	0	7:10:00
2	6:05:00	5	7:15:00	40	6:05:00	5	7:15:00
3	6:10:00	5	7:20:00	41	6:10:00	5	7:20:00
4	6:15:00	5	7:25:00	42	6:15:00	5	7:25:00
5	6:20:00	5	7:30:00	43	6:20:00	5	7:30:00
6	6:25:00	5	7:35:00	44	6:25:00	5	7:35:00
7	6:30:00	5	7:40:00	45	6:30:00	5	7:40:00
8	6:35:00	5	7:45:00	46	6:35:00	5	7:45:00
9	6:40:00	5	7:50:00	47	6:40:00	5	7:50:00
10	6:45:00	5	7:55:00	48	6:45:00	5	7:55:00
11	6:50:00	5	8:00:00	49	6:50:00	5	8:00:00
12	6:55:00	5	8:05:00	50	6:55:00	5	8:05:00
13	7:00:00	5	8:10:00	51	7:00:00	5	8:10:00
14	7:05:00	5	8:15:00	52	7:05:00	5	8:15:00
15	7:10:00	5	8:20:00	53	7:10:00	5	8:20:00
16	7:15:00	5	8:25:00	54	7:15:00	5	8:25:00
17	7:20:00	5	8:30:00	55	7:20:00	5	8:30:00
18	7:25:00	5	8:35:00	56	7:25:00	5	8:35:00
19	7:30:00	5	8:40:00	57	7:30:00	5	8:40:00
20	7:35:00	5	8:45:00	58	7:35:00	5	8:45:00
21	7:40:00	5	8:50:00	59	7:40:00	5	8:50:00
22	7:45:00	5	8:55:00	60	7:45:00	5	8:55:00
23	7:50:00	5	9:00:00	61	7:50:00	5	9:00:00
24	7:55:00	5	9:05:00	62	7:55:00	5	9:05:00
25	8:00:00	5	9:10:00	63	8:00:00	5	9:10:00
26	8:05:00	5	9:15:00	64	8:05:00	5	9:15:00
27	8:10:00	5	9:20:00	65	8:10:00	5	9:20:00
28	8:15:00	5	9:25:00	66	8:15:00	5	9:25:00
29	8:20:00	5	9:30:00	67	8:20:00	5	9:30:00
30	8:25:00	5	9:35:00	68	8:25:00	5	9:35:00
31	8:30:00	5	9:40:00	69	8:30:00	5	9:40:00
32	8:35:00	5	9:45:00	70	8:35:00	5	9:45:00
33	8:40:00	5	9:50:00	71	8:40:00	5	9:50:00
34	8:45:00	5	9:55:00	72	8:45:00	5	9:55:00
35	8:50:00	5	10:00:00	73	8:50:00	5	10:00:00
36	8:55:00	5	10:05:00	74	8:55:00	5	10:05:00
37	9:00:00	5	10:10:00	75	9:00:00	5	10:10:00
38	9:05:00	5	10:15:00	76	9:05:00	5	10:15:00
39	9:10:00	5	10:20:00	1	9:10:00	5	10:20:00
40	9:15:00	5	10:25:00	2	9:15:00	5	10:25:00
41	9:20:00	5	10:30:00	3	9:20:00	5	10:30:00
42	9:25:00	5	10:35:00	4	9:25:00	5	10:35:00
43	9:30:00	5	10:40:00	5	9:30:00	5	10:40:00
44	9:35:00	5	10:45:00	6	9:35:00	5	10:45:00
45	9:40:00	5	10:50:00	7	9:40:00	5	10:50:00
46	9:45:00	5	10:55:00	8	9:45:00	5	10:55:00
47	9:50:00	5	11:00:00	9	9:50:00	5	11:00:00
48	9:55:00	5	11:05:00	10	9:55:00	5	11:05:00
49	10:00:00	5	11:10:00	11	10:00:00	5	11:10:00
50	10:05:00	5	11:15:00	12	10:05:00	5	11:15:00
51	10:10:00	5	11:20:00	13	10:10:00	5	11:20:00
52	10:15:00	5	11:25:00	14	10:15:00	5	11:25:00
53	10:20:00	5	11:30:00	15	10:20:00	5	11:30:00
54	10:25:00	5	11:35:00	16	10:25:00	5	11:35:00
55	10:30:00	5	11:40:00	17	10:30:00	5	11:40:00
56	10:35:00	5	11:45:00	18	10:35:00	5	11:45:00
57	10:40:00	5	11:50:00	19	10:40:00	5	11:50:00
58	10:45:00	5	11:55:00	20	10:45:00	5	11:55:00
59	10:50:00	5	12:00:00	21	10:50:00	5	12:00:00
60	10:55:00	5	12:05:00	22	10:55:00	5	12:05:00
61	11:00:00	5	12:10:00	23	11:00:00	5	12:10:00
62	11:05:00	5	12:15:00	24	11:05:00	5	12:15:00
63	11:10:00	5	12:20:00	25	11:10:00	5	12:20:00
64	11:15:00	5	12:25:00	26	11:15:00	5	12:25:00
65	11:20:00	5	12:30:00	27	11:20:00	5	12:30:00
66	11:25:00	5	12:35:00	28	11:25:00	5	12:35:00
67	11:30:00	5	12:40:00	29	11:30:00	5	12:40:00
68	11:35:00	5	12:45:00	30	11:35:00	5	12:45:00
69	11:40:00	5	12:50:00	31	11:40:00	5	12:50:00
70	11:45:00	5	12:55:00	32	11:45:00	5	12:55:00
71	11:50:00	5	13:00:00	33	11:50:00	5	13:00:00
72	11:55:00	5	13:05:00	34	11:55:00	5	13:05:00
73	12:00:00	5	13:10:00	35	12:00:00	5	13:10:00
74	12:05:00	5	13:15:00	36	12:05:00	5	13:15:00
75	12:10:00	5	13:20:00	37	12:10:00	5	13:20:00
76	12:15:00	5	13:25:00	38	12:15:00	5	13:25:00

Figura 7.7: Día típico Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca.

7.6.1. Flotilla eléctrica.

Con base en los requerimientos de movilidad de cada una de las rutas de las ciudades caso de estudio, fue calculada la cantidad de vehículos eléctricos necesarios para sustituir a los vehículos de combustión interna. Para tal fin, en primer lugar, con la ecuación 6.11 se determina la cantidad mínima de vehículos de combustión requeridos para cubrir la demanda de transporte público. Para proporcionar el servicio de transporte, acorde a las condiciones operativas actuales de las rutas caso de estudio, se requieren de 42 vagonetas a gasolina para la Ruta Gris y de 30 camiones a Diesel para la Ruta Uno. La siguiente tabla contiene el número de VCIs necesarios para cada ruta.

Ciudad	Ruta	Distancia viaje (km)	Tiempo viaje (min)	Viajes por día	Distancia día (km)	Cantidad mínima VCI
Morelia	Ruta Gris	30	60	17	510	42
Cuernavaca	Ruta Uno	20	70	13	260	30

Tabla 7.9: Requerimientos operativos de la rutas de transporte y cantidad mínima de vehículos de combustión interna necesarios.

Dado que los vehículos eléctricos tienen una autonomía limitada por la cantidad de energía disponible en sus baterías, requieren de recargas para satisfacer la demanda del servicio de transporte. Estas recargas toman un cierto tiempo que varía en función de la cantidad de energía que se debe suministrar a las baterías y la potencia eléctrica del cargador. Se recomienda descargar la batería no más de un 20 % de su capacidad, con la finalidad de prolongar su vida útil [22]. Las figuras 7.8 y 7.9 muestran el rango de trabajo de los vehículos eléctricos seleccionados. La siguiente tabla muestra la cantidad de kilómetros que pueden ser recorridos por los vehículos eléctricos con la carga completa de sus baterías.

Ciudad	Ruta	Distancia viaje (km)	Distancia día (km)	Vehículo Eléctrico	Autonomía (km)	Cantidad de viajes VE
Morelia	Ruta Gris	30	510	Van E5	240	8
Cuernavaca	Ruta Uno	20	260	E-bus	200	10

Tabla 7.10: Cantidad de viajes que pueden ser realizados por los vehículos eléctricos con una carga completa.



Figura 7.8: Rango de trabajo de la vagoneta eléctrica E5.



Figura 7.9: Rango de trabajo del camión eléctrico Ebus.

Los vehículos de combustión interna de la ruta gris y la ruta uno realizan diariamente 17 y 13 viajes (comúnmente llamados vueltas) respectivamente. Como se muestra en la tabla 7.10 los vehículos eléctricos únicamente pueden realizar 8 y 10 vueltas con una sola carga de energía. De tal manera que, para cubrir la demanda de transporte es necesario recargar sus baterías. Por lo tanto, se requiere incluir vehículos eléctricos adicionales que presten el servicio mientras tiene lugar la carga de energía. Estos vehículos eléctricos adicionales se calculan con la ecuación 6.13. La tabla 7.11 contiene la cantidad de vehículos eléctricos adicionales requeridos, así como la cantidad de la flotilla eléctrica.

Ruta	Tiempo viaje (min)	Gap (min)	Potencia Cargador (kW)	Tiempo de Carga (min)	VE Adicionales	Flotilla VE
Ruta Gris	60	3	200	17	12	54
Ruta Uno	70	5	200	15	6	36

Tabla 7.11: Flotillas de Vehículos eléctricos considerando potencia de cargador de 200kW.

Para proveer el servicio de transporte de la Ruta Gris en la ciudad de Morelia serían requeridos 54 vehículos eléctricos. La flotilla vehicular de la Ruta Uno en la ciudad de Cuernavaca estaría compuesta por 36 camiones eléctricos. La tabla 7.12 muestra el costo de estas unidades y su valor presente neto, el cual es mayor al de los vehículos de combustión interna.

Ciudad	Flotilla	Costo Flotilla VE (USD)	VPN
Morelia	54	2,430,000	30,533,181
Cuernavaca	36	5,168,000	50,957,396

Tabla 7.12: Valor Presente Neto de las Flotillas de Vehículos Eléctricos para la ciudad de Morelia y Cuernavaca.

La autonomía de los vehículos eléctricos así como el tiempo de carga son aspectos que deben ser considerados para determinar la cantidad de vehículos eléctricos que deben integrar la flotilla. La sustitución de las flotas de combustión interna por vehículos eléctricos que satisfagan los requerimientos operativos de las rutas de transporte es totalmente viable. Los resultados muestran las bondades económicas y ambientales relacionadas con el reemplazo de los vehículos de combustión interna.

Conclusiones.

En México, en las ciudades de tamaño mediano, el servicio de transporte público es una necesidad básica para la población que no tiene la posibilidad de poseer un vehículo propio. En muchas ocasiones es la única alternativa para desplazarse de un lugar a otro, por lo que constituye un elemento muy importante en el desarrollo de la actividad económica y social en el medio urbano. En México, el transporte público está concesionado por el gobierno a empresas particulares, la mayoría de los sistemas de transporte usan autobuses y vagonetas de combustión interna. Estos vehículos, generalmente, ya han excedido su vida útil pero siguen en operación, utilizan combustibles fósiles como Diesel, gas o gasolina produciendo gases contaminantes que modifican la composición del aire que respiramos, afectan considerablemente la salud de la población y contribuyen al agravamiento del cambio climático. Por ello, es esencial llevar a cabo estudios que busquen alternativas para modificar o mitigar los efectos adversos asociados a la operación del transporte público basado en combustibles fósiles en ciudades medianas en México. En este trabajo se explora la posibilidad de avanzar hacia la movilidad eléctrica colectiva. Así, se realizó un análisis económico que muestra la viabilidad y los posibles beneficios relacionados con el reemplazo de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos para el transporte público en ciudades medianas en México. Al considerar las condiciones actuales de operación se calculó el costo de combustible y las emisiones de CO₂ relacionadas con la operación del sistema de transporte público actual y con reemplazo por vehículos de combustión interna o eléctricos. Una vez que los requerimientos de movilidad fueron identificados, se seleccionaron vehículos eléctricos alternativos que pudieran sustituir a los vehículos actuales bajo supuestos de cumplir con la operatividad actual. Posteriormente, se determinó la demanda energética y el costo por kilómetro con los vehículos eléctricos seleccionados. También se propuso la integración de sistemas fotovoltaicos que contribuyan con una fracción de la demanda de energía y disminuyan sustancialmente las emisiones de CO₂.

Se encontró que la transición a la movilidad eléctrica trae beneficios económicos y ambientales muy convenientes. Para la ciudad de Morelia, la movilidad eléctrica es un 85 % más económica que la movilidad actual; moverse un kilómetro con los vehículos de combustión interna actuales cuesta \$3 MXN, mientras que hacerlo con los vehículos eléctricos propuestos cuesta \$0.38 MXN. En el caso de la ciudad de Cuernavaca el costo actual en autobús Diesel por kilómetro es de \$ 7.3 MXN; mientras tanto, el costo del Ebus por kilómetro es de \$0.32 MXN. Así, la movilidad eléctrica es un 95 % más barata que la movilidad ICV. Como resultado de la transición, encontramos una reducción de emisiones de CO₂. El transporte público eléctrico podría reducir las emisiones anuales de CO₂ alrededor de un 50 %, de 2684 a 1335 CO₂ (TONs) para Morelia y un 85 % de 4023 a 619 CO₂ (TONs) para la ciudad de Cuernavaca. Además, al instalar tecnología fotovoltaica en las estaciones se contribuye a una mayor reducción de emisiones: para la ciudad de Morelia las emisiones disminuyen anualmente un 65 % de 2684 a 991 CO₂ (TONs) y un 90 % en la ciudad de Cuernavaca de 4023 a 290 CO₂ (TONs). La tecnología fotovoltaica reduce la demanda de energía de la red y disminuye las emisiones de CO₂. Por ello, es imperativo pasar al transporte público eléctrico, teniendo en cuenta

las fuentes de energía renovables. El análisis muestra la factibilidad económica de reemplazar los vehículos de combustión interna que actualmente brindan el servicio de transporte público en Morelia y Cuernavaca por vehículos eléctricos eficientes compatibles con fuentes de energía renovable. Cabe destacar que la metodología propuesta en este trabajo puede ser aplicada a cualquier otra ciudad.

Actualmente, los avances tecnológicos permiten implementar sistemas en los que las baterías de los vehículos eléctricos sean intercambiables. Estos sistemas permiten reemplazar las baterías descargadas por baterías previamente cargadas de energía. Al intercambiar baterías, se puede montar un banco de baterías con al menos el 93 % de carga. Esta alternativa posibilita la recarga de energía de manera inmediata, inclusive con un tiempo menor a la carga de combustible de un vehículo de combustión interna. Por otro lado, la tecnología de carga ultrarápida parece ser la opción por la que la mayoría de los fabricantes de vehículos eléctricos se han decidido. Con cargadores con potencias de hasta 450 kW que permiten recuperar el 80 % de la capacidad de la batería en 20 minutos [51]. Ambas tecnologías presentan ventajas e inconvenientes, sería de interés, en un futuro, llevar a cabo un análisis de estas alternativas, y determinar, bajo las condiciones operativas del transporte público de las ciudades medianas en México, cuál alternativa sería más apropiada.

Adicionalmente, los flujos vehiculares de las rutas de transporte público podrían ser objeto de análisis y estudio. Esto permitiría monitorear el tráfico, obtener información en tiempo real sobre los tiempos de traslados, ubicación de los vehículos, y gap entre vehículos. Estos datos serían de utilidad para elaborar estrategias para administrar la energía de forma eficiente, ya que permitirían recargar los vehículos eléctricos en los momentos más adecuados, asegurando la prestación del servicio sin interrupciones. Además permitiría determinar la ubicación de posibles sistemas de carga (electrolineras) en lugares estratégicos dentro del recorrido de los vehículos eléctricos. Es necesario también, en el futuro cercano, trabajar en el desarrollo de políticas públicas que incentiven y aceleren la transición hacia la movilidad eléctrica colectiva, el estado Mexicano tendrá un rol de vital importancia, ya que, como se ha visto en otros países, el estado es un actor clave y fundamental que coadyuva en la implementación de este tipo de tecnologías, otorgando financiamientos a tasas de interés preferenciales e incentivos fiscales y en la formación de recursos humanos calificados.

Bibliografía

- [1] Xianchun Tan, Yi Wang, Baihe Gu, Lingsi Kong, and An Zeng. Research on the national climate governance system toward carbon neutrality—a critical literature review. *Fundamental Research*, 2022.
- [2] INECC. Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero 1990-2015. Technical report, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018.
- [3] Qingbin Song, Zhishi Wang, Ye Wu, Jinhui Li, Danfeng Yu, Huabo Duan, and Wenyi Yuan. Could urban electric public bus really reduce the ghg emissions: A case study in macau? *Journal of cleaner production*, 172:2133–2142, 2018.
- [4] IRENA. Electric vehicles: technology brief. Technical report, International Renewable Energy Agency, 2017.
- [5] International Renewable Energy Agency. renewable power generation costs. Technical report, IRENA, 2018.
- [6] Roberto Ruggieri, Marco Ruggeri, Giuliana Vinci, and Stefano Poponi. Electric mobility in a smart city: European overview. *Energies*, 14(2):315, 2021.
- [7] M.J. Booyesen, C.J. Abraham, A.J. Rix, and I. Ndibatya. Walking on sunshine: Pairing electric vehicles with solar energy for sustainable informal public transport in uganda. *Energy Research & Social Science*, 85:102403, 2022.
- [8] Mariusz Kubański. Prospects for the use of electric vehicles in public transport on the example of the city of czechowice-dziedzice. *Transportation Research Procedia*, 44:110–114, 2020. LOGI 2019 - Horizons of Autonomous Mobility in Europe.
- [9] Nathan Parker, Hanna L Breetz, Deborah Salon, Matthew Wigginton Conway, Jeffrey Williams, and Maxx Patterson. Who saves money buying electric vehicles? heterogeneity in total cost of ownership. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 96:102893, 2021.
- [10] Marc Schmidt, Philipp Staudt, and Christof Weinhardt. Decision support and strategies for the electrification of commercial fleets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97:102894, 2021.
- [11] Mads Greaker. Optimal regulatory policies for charging of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97:102922, 2021.

-
- [12] Gautham Ram Chandra Mouli, Mark Leendertse, Venugopal Prasanth, Pavol Bauer, Sacha Silvester, Stefan van de Geer, and Miro Zeman. Economic and co2 emission benefits of a solar powered electric vehicle charging station for workplaces in the netherlands. In *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pages 1–7. IEEE, 2016.
- [13] Jie Tang, Bin Ye, Qiang Lu, Dong Wang, and Ji Li. Economic analysis of photovoltaic electricity supply for an electric vehicle fleet in shenzhen, china. *International Journal of Sustainable Transportation*, 8(3):202–224, 2014.
- [14] Raquel Figueiredo, Pedro Nunes, and Miguel C Brito. The feasibility of solar parking lots for electric vehicles. *Energy*, 2017.
- [15] Ellen De Schepper, Steven Van Passel, and Sebastien Lizin. Economic benefits of combining clean energy technologies: the case of solar photovoltaics and battery electric vehicles. *International journal of energy research*, 2015.
- [16] Young-Min Wi, Jong-Uk Lee, and Sung-Kwan Joo. Electric vehicle charging method for smart homes/buildings with a photovoltaic system. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 59(2):323–328, 2013.
- [17] Dennis van der Meer, Gautham Ram Chandra Mouli, German Morales-Espana Mouli, Laura Ramirez Elizondo, and Pavol Bauer. Energy management system with pv power forecast to optimally charge evs at the workplace. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(1):311–320, 2018.
- [18] Yi Guo, Jingwei Xiong, Shengyao Xu, and Wencong Su. Two-stage economic operation of microgrid-like electric vehicle parking deck. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(3):1703–1712, 2015.
- [19] Katrin Seddig, Patrick Jochem, and Wolf Fichtner. Integrating renewable energy sources by electric vehicle fleets under uncertainty. *Energy*, 141:2145–2153, 2017.
- [20] Pinak J Tulpule, Vincenzo Marano, Stephen Yurkovich, and Giorgio Rizzoni. Economic and environmental impacts of a pv powered workplace parking garage charging station. *Applied Energy*, 108:323–332, 2013.
- [21] Antti Lajunen. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38:1–15, 2014.
- [22] Matthias Rogge, Sebastian Wollny, and Dirk Uwe Sauer. Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport—a feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. *Energies*, 8(5):4587–4606, 2015.
- [23] Patrick Plötz, SA Funke, Patrick Jochem, and Martin Wietschel. Co2 mitigation potential of plug-in hybrid electric vehicles larger than expected. *Scientific reports*, 7(1):1–6, 2017.
- [24] Yuhua Zheng, Shiqi Li, and Shuangshuang Xu. Transport oil product consumption and ghg emission reduction potential in china: An electric vehicle-based scenario analysis. *Plos one*, 14(9):e0222448, 2019.

-
- [25] Fernando Rojas Parra and Carlos Mello Garcias. El transporte público colectivo en curitiba y bogotá. *Revista de ingeniería*, (21):106–115, 2005.
- [26] PUBLICO EN ESPANA. Análisis del mercado de servicios de transporte público en españa: costes, demanda, precios y nivel de calidad. *Investigaciones económicas (segunda época)*, 15(2):229–247, 1991.
- [27] Hemant K Suman, Nomesh B Bolia, and Geetam Tiwari. Comparing public bus transport service attributes in delhi and mumbai: Policy implications for improving bus services in delhi. *Transport Policy*, 56:63–74, 2017.
- [28] Marco Alberto Valenzo-Jiménez, Daniel Adan Lázaro-López, and Jaime Apolinar Martínez-Arroyo. Application of the servqual model to evaluate the quality in the transportation service in morelia, mexico. *Dyna*, 86(211):64–74, 2019.
- [29] Analí Melo Vázquez et al. Eficiencia del transporte público en la ciudad de morelia, michoacán en el año 2015: una propuesta de política pública. 2016.
- [30] Jinho Baik, Alexei Borodin, Percy Deift, and Toufic Suidan. A model for the bus system in cuernavaca (mexico). *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 39(28):8965, 2006.
- [31] Milan Krbálek and Petr Seba. The statistical properties of the city transport in cuernavaca (mexico) and random matrix ensembles. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 33(26):L229, 2000.
- [32] Piotr Warchoń. Buses of cuernavaca—an agent-based model for universal random matrix behavior minimizing mutual information. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 51(26):265101, 2018.
- [33] Carla C Lima Aranzaes and Arturo Juárez García. Un estudio exploratorio sobre estresores laborales en conductores de transporte público colectivo en el estado de morelos, méxico. *Cienc. Trab*, pages 126–131, 2008.
- [34] Gabriel Dorantes-Argandar, Edna Yasiel Rivera-Vázquez, and Karlena María Cárdenas-Espinoza. Measuring situations that stress public bus users in mexico: a case study of cuernavaca, morelos. *Public Transport*, 11(3):577–587, 2019.
- [35] Comisión Reguladora de Energía CRE. Precios vigentes combustibles. <https://www.gob.mx/cre/articulos/precios-vigentes-de-gasolinas-y-diesel>.
- [36] Fabien Leurent and Elisabeth Windisch. Triggering the development of electric mobility: a review of public policies. *European Transport Research Review*, 3(4):221–235, 2011.
- [37] Electric Vehicles IEA. <http://www.iea.org/reports/electric-vehicles>, 2021.
- [38] APEX Market Research. https://www.apexmarketsresearch.com/report/electric-bus-market-by-propulsion-type-bev-phev-666026/?utm_source=vaibhav#summary.
- [39] Fresno County Rural Transit Agency. <http://calenergycommission.blogspot.com/2017/05/mobile-solar-electric-vehicle-chargers.html>.

-
- [40] Secretaría de Energía. Evaluación rápida del uso de la energía. Technical report, Secretaría de Energía, Banco Mundial, 2015.
- [41] Carlo Cunanan, Manh-Kien Tran, Youngwoo Lee, Shinghei Kwok, Vincent Leung, and Michael Fowler. A review of heavy-duty vehicle powertrain technologies: Diesel engine vehicles, battery electric vehicles, and hydrogen fuel cell electric vehicles. *Clean Technologies*, 3(2):474–489, 2021.
- [42] Shiyan Rockrich Industry. <http://www.rockrich.com.cn/>.
- [43] Shiyan Rockrich Industry. https://www.alibaba.com/product-detail/joylong-high-end-15-seats-electric_60833631212.html, 2022.
- [44] Shiyan Rockrich Industry. https://www.alibaba.com/product-detail/Famous-Dongfeng-brand-21-to-40_1600270073121.html?spm=a2700.themePage.order.17.6fd4233dK3NsGb, 2022.
- [45] LG company. Pv datasheet. <https://www.lg.com/es/business/neon-r>.
- [46] NASA. National aeronautics and space administration. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [47] IPCC. Intergovernmental panel on climate change. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf.
- [48] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf.
- [49] Comisión Reguladora de Energía. Factor de emisión del sector eléctrico nacional. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/304573/Factor_de_Emision_del_Sector_Electrico_Nacional_1.pdf.
- [50] Bloomberg. Battery pack prices. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to>
- [51] García Gonzalo. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/carga-ultrarrapida-intercambio-baterias-batalla-china/20220817114513061460.html>, 2022.

Anexos

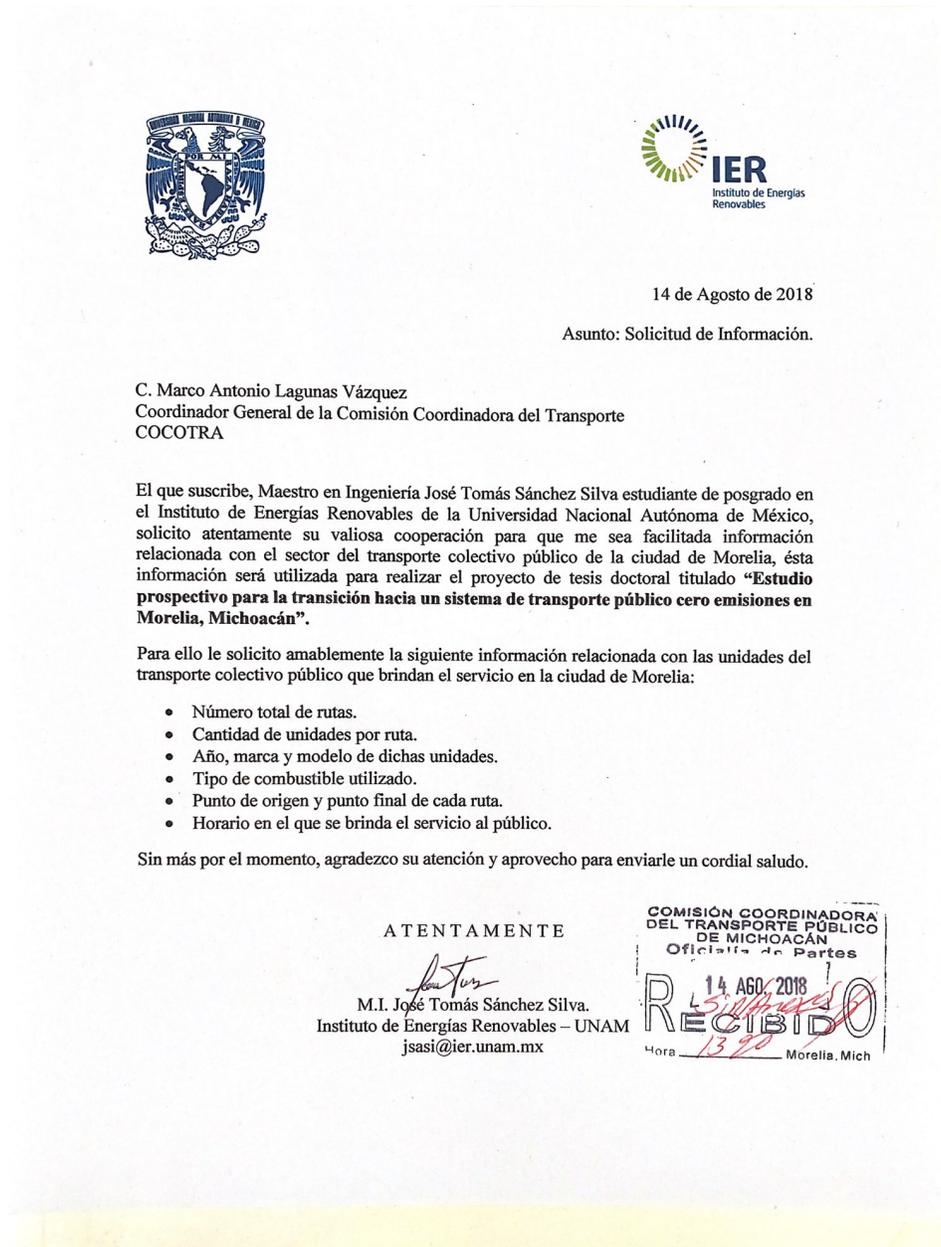


Figura 10: Solicitud de información sistema de transporte público a la Comisión Coordinadora del Transporte.



16 de Agosto de 2018

Asunto: Solicitud de Información.

C. Fernando Orozco Miranda
Presidente Colectivo Ruta Gris A.C. Morelia.

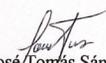
El que suscribe, Maestro en Ingeniería José Tomás Sánchez Silva estudiante de posgrado en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, solicito atentamente su valiosa cooperación para que me sea facilitada información relacionada con el servicio brindado por la Ruta Gris, ésta información será utilizada para realizar el proyecto de tesis doctoral titulado **“Estudio prospectivo para la transición hacia un sistema de transporte público cero emisiones en Morelia, Michoacán”**.

Para ello le solicito amablemente la siguiente información relacionada con las unidades del transporte colectivo público que brindan el servicio en la ciudad de Morelia:

- Número total de rutas.
- Cantidad de unidades por ruta.
- Año, marca y modelo de dichas unidades.
- Tipo de combustible utilizado.
- Punto de origen y punto final de cada ruta.
- Horario en el que se brinda el servicio al público.

Sin más por el momento, agradezco su atención y aprovecho para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE


M.I. José Tomás Sánchez Silva.
Instituto de Energías Renovables – UNAM
jsasi@ier.unam.mx



RECIBIDO:
10:25 AM.

Figura 11: Solicitud de información parque vehicular a la ruta gris.



25 de Febrero de 2020.

C. Fernando Orozco Miranda.
Presidente Colectivo Ruta Gris A.C. Morelia.

El que suscribe, Maestro en Ingeniería José Tomás Sánchez Silva estudiante de posgrado en el Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), solicito de la manera más atenta su colaboración para permitirme obtener información sobre la operación (itinerario) de la ruta gris 1 y sus ramales. Dicha información será utilizada para la realización del proyecto de tesis doctoral titulado "Estudio prospectivo para la transición hacia un sistema de transporte publico cero emisiones en ciudades de tamaño mediano en México".

Sin otro particular, agradezco su atención y le envío un cordial saludo.


ATENTAMENTE
M. I. José Tomás Sánchez Silva.
Instituto de Energías Renovables, UNAM.
jsasi@ier.unam.mx



REABI
William
Jade MC

Figura 12: Solicitud de información operativa de la ruta gris.

Parámetros principales Vagoneta Eléctrica Shiyen Rockrich Industry	
Modelo de vehículo	E5
Longitud * ancho * alto (Mm)	5380*1880*2285
Distancia entre ejes (mm)	3110
Max. Velocidad (km/h)	100
Tipo de batería	Batería de O2 LI (nicon)
Tensión nominal (V)	360
Capacidad de la batería (KWH)	88,1
Potencia nominal Motor (KW)	50/100
Motor Par nominal (KW)	159/320
Voyage curso (KM)	300
Asientos	15 (2 + 3 + 3 + 3 + 4)
Neumáticos	195R15C Neumático radial
Sistema de frenos	Disco/tambor, iniciativa de refuerzo de vacío, ABS + EBD
Suspensión	Suspensión independiente de la suspensión independiente/parte variable trasera, sistema de dirección asistida
Eje trasero Costo	Integrado prensado eje trasero 45000 DLLS

Figura 13: Características técnicas vagoneta eléctrica.

Dimensiones (LxWxH mm)	6500 × 2200 × 2600,2800
F/R voladizo (mm)	1375/1375
Neumático de especificación	215/75R17 5
Potencia nominal (kw)	45
Masa de Kerb/carga de eje (kg)	5100: 2000/3100
Masa Total/carga del eje (kg)	7500: 3000/4500
La capacidad de asientos	35/10-17
Reserva Total de batería (kwh)	60
Rango de conducción (km)	251
Tipo de batería	De litio de manganate
Suspensión	Menos hoja de primavera suspensión
Costo	68,000 DLLS

Figura 14: Características técnicas Bus Eléctrico.

NeON® R					
Características del producto	Monocrystalino de tipo N				
	60célula (6 x 10)				
Energía	370W	365W	360W	355W	350W
Eficiencia modular	21.4%	21.1%	20.8%	20.6%	20.3%
Peso	18.5 kg				
Dimensiones	1700 x 1016 x 40 mm				
Garantía de rendimiento	Garanzia lineare (1.er año: 98 % / Después del 1.er año: 0.4 % degradación anual / 88.4 % durante 25 años)				
Garantía de producto	25 años				

Figura 15: Características técnicas módulo fotovoltaico.