



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos
Regulados

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE UNA
INFRAESTRUCTURA DE CARGA VEHICULAR DE ACCESO PÚBLICO EN GUATEMALA**

Ing. Josué Enrique Juárez Coronado

Asesorado por la MSc. Inga. Ismelda Isabel López Tohom

Guatemala, abril de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE UNA
INFRAESTRUCTURA DE CARGA VEHICULAR DE ACCESO PÚBLICO EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JOSUÉ ENRIQUE JUÁREZ CORONADO
ASESORADO POR LA MSC. INGA. ISMELDA ISABEL LÓPEZ TOHOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
**MAESTRO EN ARTES EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS
REGULADOS**

GUATEMALA, ABRIL DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA DE TESIS

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Mauro Fernando Oroxóm Popa
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE CARGA VEHICULAR DE ACCESO PÚBLICO EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 07 de noviembre de 2022.

Ing. Josué Enrique Juárez Coronado



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.358.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE CARGA VEHICULAR DE ACCESO PÚBLICO EN GUATEMALA**, presentado por: **Ing. Josué Enrique Juárez Coronado**, que pertenece al programa de Maestría en Artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, abril de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, abril de 2023

LNG.EEP.OI.358.2023

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE
UNA INFRAESTRUCTURA DE CARGA VEHICULAR DE ACCESO
PÚBLICO EN GUATEMALA”**

presentado por **Ing. Josué Enrique Juárez Coronado** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE CARGA VEHICULAR DE ACCESO PÚBLICO EN GUATEMALA** del estudiante **Josué Enrique Juárez Coronado** quien se identifica con número de carné **201603026** del programa de Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el ***Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.*** Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE CARGA VEHICULAR DE ACCESO PÚBLICO EN GUATEMALA"** del estudiante **Josué Enrique Juárez Coronado** del programa de **Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados** identificado(a) con número de carné 201603026.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Inga. Ismelda López Tohom
Col. 5943

Inga. Ismelda López Tohom
Col. 5943




Mtra. Inga. Ismelda Isabel López Tohom
Colegiado No. 5943
Asesora de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Zoila Coronado y Hugo Juárez, por su apoyo, paciencia y amor durante todos estos años.

Mi abuelita

Imelda Coronado, por ser ejemplo de bondad y sabiduría, y por inculcarme el amor por el conocimiento.

Mis hermanos

Melany, Melissa y Álvaro Juárez, por ser mi inspiración y mi apoyo.

Tío

Ricardo Juárez, por su apoyo y por ser como mi hermano mayor.

Amigos

Mario Diaz, Marco Castellanos, Erick Lool, David Simón, Christian de la Cruz, Erick Mendoza, Kevin Duarte, Marco Chew, Heather Salamanca, Javier Navarro, Jairo García y demás compañeros que hicieron mi estadía en la universidad una experiencia única de apoyo y compañerismo.

Mi novia

Mitchel Cano, por sus consejos, conocimientos y apoyo durante los últimos años de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser el lugar físico que me permitió desarrollarme profesionalmente, en sus bibliotecas, sus pasillos y sus clases queda parte importante de mi vida.

Facultad de Ingeniería

Por los conocimientos adquiridos, permitirme conocer personas excepcionales y profesionales que aportaron de alguna u otra manera a mi formación.

Mi asesor

MSc. Inga. Ismelda Isabel López Tohom, por compartirme su conocimiento y ser mi guía en este trabajo.

Profesor revisor

Dr. Renato Ponciano por su paciencia y acompañamiento en el desarrollo de este estudio.

**Departamento de
Matemáticas**

Al Ing. Arturo Samayoa por confiar en mis capacidades y permitirme desempeñarme como auxiliar de cátedra.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. MARCO REFERENCIAL	1
1.1. Antecedentes.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Vehículo eléctrico	5
2.1.1. Vehículo eléctrico de baterías.....	6
2.1.2. Vehículo híbrido enchufable	9
2.1.3. Vehículo eléctrico de rango extendido	10
2.1.4. Autonomía del vehículo eléctrico	11
2.2. Infraestructura de carga vehicular	12
2.2.1. Tipos de carga	12
2.2.1.1. Carga lenta	12
2.2.1.2. Carga normal	13
2.2.1.3. Carga semi rápida	14
2.2.1.4. Carga rápida	16
2.2.2. Tipos de conectores	17

	2.2.2.1.	Modo 3	17
	2.2.2.2.	Modo 4	17
2.2.3.		Tipos de infraestructura de carga.....	18
	2.2.3.1.	Instalaciones de carga residencial	18
	2.2.3.2.	Instalaciones de carga en puestos de trabajo	19
	2.2.3.3.	Instalaciones de carga de acceso público	19
2.3.		Movilidad eléctrica en Guatemala	20
	2.3.1.	Planes nacionales	20
	2.3.1.1.	Política energética 2019-2050.....	20
	2.3.1.2.	Plan nacional de energía 2017-2032....	22
	2.3.1.3.	Plan nacional de eficiencia energética 2019-2032	24
	2.3.2.	Estadísticas del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.....	24
2.4.		Movilidad eléctrica en mercados internacionales	26
	2.4.1.	Latinoamérica.....	27
	2.4.1.1.	Costa Rica.....	27
	2.4.1.2.	Ecuador	28
	2.4.1.3.	Chile	28
	2.4.1.4.	Uruguay.....	29
	2.4.1.5.	Resumen del crecimiento del parque vehicular en Latinoamérica.....	29
	2.4.1.6.	Indicadores relevantes en mercados de Latinoamérica.....	34
	2.4.2.	Movilidad eléctrica en Estados Unidos, Europa y Asia	35
	2.4.2.1.	Estados Unidos	36

2.4.2.2.	Europa	37
2.4.2.3.	China	40
2.4.2.4.	Indicadores relevantes en mercados desarrollados	40
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	45
3.1.	Características del estudio	45
3.1.1.	Enfoque del estudio	45
3.1.2.	Alcance del estudio.....	45
3.1.3.	Diseño del estudio	46
3.2.	Unidades de análisis	46
3.3.	Variables.....	46
3.4.	Fases de estudio	49
3.4.1.	Fase 1: exploración bibliográfica	50
3.4.2.	Fase 2: creación de un modelo de crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala para el período 2022-2037	50
3.4.3.	Fase 3: determinación una cantidad apropiada de estaciones de recarga pública para vehículos eléctricos en Guatemala	51
3.4.4.	Fase 4: determinación de la demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos en el período 2022-2037.....	53
3.4.5.	Fase 5: determinación del impacto de la recarga vehicular pública en el sistema nacional interconectado	54
3.4.6.	Fase 6: ubicación de nodos y líneas con problemas de cargabilidad y/o regulación de tensión	55

3.5.	Técnicas de análisis de la información.....	56
3.5.1.	Definición de técnicas de análisis.....	57
3.5.1.1.	Medidas de tendencia central.....	58
3.5.1.2.	Medidas de variabilidad.....	58
3.5.1.3.	Coeficiente de correlación de Pearson	59
3.5.1.4.	Coeficiente de determinación	59
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	61
4.1.	Modelo de crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala para el período 2022-2037.....	61
4.2.	Determinación de una cantidad apropiada de estaciones de recarga pública en Guatemala	64
4.3.	Determinación de la demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos para el período 2022-2037	66
4.4.	Determinación del impacto de la recarga vehicular pública en el sistema nacional interconectado	70
4.4.1.	Resultados utilizando proyección con base en modelo histórico	72
4.4.2.	Resultados utilizando proyección con base en crecimiento bajo establecido por el MEM.....	75
4.4.3.	Resultados utilizando proyección con base en crecimiento medio establecido por el MEM	79
4.5.	Ubicación de nodos y líneas con problemas de cargabilidad y/o regulación de tensión y que podrían no soportar el aumento de demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos	82

5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	87
5.1.	¿Cuántas estaciones de carga pública son necesarias para satisfacer el crecimiento del parque de vehículos eléctricos en el país?	87
5.2.	¿Qué escenarios de demanda de potencia y energía se pueden presentar ante la probabilidad de distintos requerimientos de carga a lo largo del día?.....	89
5.3.	¿Cuánta demanda total de potencia y energía se tendría en el país debido a la construcción de una red de carga pública para vehículos eléctricos?	91
5.4.	¿Existen nodos eléctricos o líneas de transmisión en el sistema nacional interconectado que puedan no soportar el aumento de demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos?.....	93
5.5.	¿Es factible técnicamente la construcción de una red de carga pública para vehículos eléctricos?	94
	CONCLUSIONES	97
	RECOMENDACIONES	99
	REFERENCIAS	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Vehículo eléctrico de baterías	9
2.	Vehículo híbrido enchufable	10
3.	Modo de carga tipo 2 o normal.....	14
4.	Modo de carga tipo 3 o carga semi rápida	16
5.	Crecimiento histórico de la demanda de energía anual en el SNI	25
6.	Crecimiento histórico de la demanda máxima de potencia en el SNI	26
7.	Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de México	30
8.	Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Brasil	31
9.	Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Ecuador	31
10.	Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Colombia	32
11.	Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Chile	32
12.	Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Costa Rica	33
13.	Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de República Dominicana	34
14.	Puntos de recarga públicos por millón de habitantes en países de la región	35
15.	Cantidad de vehículos por estaciones de recarga pública en países de la región	36
16.	Cantidad de vehículos y puntos de recarga público en mercados desarrollados al año 2018	41

17.	Puntos de recarga públicos por millón de habitantes en mercados desarrollados al año 2018.....	41
18.	Cantidad de vehículos por estaciones de recarga pública en mercados desarrollados por ciudades al año 2018.....	42
19.	Cantidad de vehículos por estaciones de recarga pública en mercados desarrollados por países al año 2017	42
20.	Cantidad de vehículos por estaciones de carga rápida en DC en mercados desarrollados por países al año 2017	43
21.	Porcentaje de estaciones de carga rápida en relación con total de estaciones de recarga pública en mercados desarrollados por ciudades al año 2018.....	43
22.	Modelo del crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala con base histórica de vehículos eléctricos	61
23.	Proyección del crecimiento del parque vehículos eléctricos en Guatemala utilizando modelo de Ecuador	62
24.	Proyección del crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala utilizando modelo de Costa Rica	63
25.	Proyección del crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala utilizando modelo de República Dominicana.....	63
26.	Tipo de vivienda en Guatemala	65
27.	Estaciones de recarga pública para el período de estudio para los tres modelos definidos con anterioridad	65
28.	Estaciones de carga rápida para el período de estudio para los tres modelos definidos con anterioridad	66
29.	Escenario de demanda de potencia mínima debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas	67
30.	Escenario de demanda de potencia media debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas	68

31.	Escenario de demanda de potencia máxima debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas.....	68
32.	Escenario de demanda de energía mínima en un día debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas.....	69
33.	Escenario de demanda de energía media en un día debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas.....	69
34.	Escenario de demanda de energía máxima en un día debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas.....	70
35.	Crecimiento proyectado de demanda de energía anual en el SNI	71
36.	Crecimiento proyectado de la demanda máxima de potencia en el SIN.....	71
37.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima	72
38.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media	73
39.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima.....	73
40.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima	74
41.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media	74
42.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima.....	75

43.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima	76
44.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media	76
45.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima	77
46.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima	77
47.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media	78
48.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima	78
49.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima	79
50.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media	80
51.	Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima	80

52.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima	81
53.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media	81
54.	Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima.....	82
55.	Parque de vehículos en Guatemala a julio 2022 por departamento.....	83
56.	Porcentaje de vehículos en departamentos con inconvenientes en sistema de transmisión debido al incremento de la demanda de potencia y energía.....	83

TABLAS

I.	Clasificación de vehículos según el grado de electrificación.....	7
II.	Tipo de variables	47
III.	Descripción de las variables.....	48
IV.	Datos sujetos a análisis.....	57
V.	Países considerados para crear modelo de crecimiento de vehículos eléctricos en Guatemala.....	62
VI.	Valores relevantes del factor vehículos eléctricos por estación de recarga pública.....	64
VII.	Escenarios de demanda de potencia en estaciones de recarga pública con cinco cargadores semi rápidos AC.....	67
VIII.	Escenarios de demanda de potencia en estaciones de recarga pública con cinco cargadores rápidos en DC	67

IX.	Elementos del sistema de transmisión con problemas de regulación de tensión y/o cargabilidad debido a crecimiento de la demanda para el periodo 2020-2034	84
-----	---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
r^2	Coeficiente de determinación
CO ₂	Dióxido de carbono
Hz	Hercio
Km	Kilómetro
Km/h	Kilómetro por hora
kWh	Kilovatio-hora
Tm	Toneladas métricas
V	Voltio
W	Watt

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Bandas horarias	Horarios de un día en el que se tiene diferentes niveles de demanda de energía eléctrica.
BID	Banco interamericano de desarrollo.
BTS	Tarifa baja tensión social.
Cambio climático	Cambio en la dinámica climática del planeta producto de la actividad humana.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
CO₂ equivalente	Medida en toneladas de la totalidad de gases de efecto invernadero producidos por un proceso.
Estación de recarga	Sitio físico que cuenta con conector para recarga de vehículos eléctricos.
EUFAL	Siglas de <i>European urban freight and logistics</i> .
EV	Vehículo eléctrico puro.

GLP	Gas licuado de petróleo.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional.
Interoperabilidad	Capacidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar y usar información.
KERS	Sistema de recuperación de energía cinética.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
MCI	Motor de combustión interna.
NTSD	Normas técnicas del servicio de distribución.
PHEV	Vehículo híbrido enchufable.
PIB	Producto interno bruto.
SAT	Superintendencia de administración tributaria
SNI	Sistema Nacional Interconectado.

RESUMEN

Con el decreto de la ley de incentivos para la movilidad eléctrica en Guatemala y observando las tendencias en la movilidad a nivel mundial, se espera que la oferta de vehículos eléctricos crezca, y con ello, nueva demanda de energía y potencia se sume al sistema. Es por ello por lo que el presente estudio plantea una pregunta fundamental: ¿Es técnicamente factible el desarrollo de una red de carga pública para vehículos eléctricos? La forma en la que se abordó el problema de investigación fue primero determinar cómo será el crecimiento del parque de vehículos eléctricos en el país, luego con base en el tipo de vivienda que predomina en el país se determinó un factor adecuado de vehículos por estación de carga pública, así como un porcentaje adecuado de estaciones de carga rápida. Una vez se determinó este crecimiento, fue posible analizar los posibles escenarios de demanda ante distintos requerimientos en un día. Al obtener estos escenarios de demanda, se añadió este nuevo valor a la demanda proyectada para el país con lo cual fue posible establecer en qué porcentaje incidiría una red de carga pública al sistema.

Los resultados muestran que el crecimiento de vehículos eléctricos sigue una tendencia polinomial de grado tres para dos modelos obtenidos y una tendencia lineal para un tercer modelo obtenido. El crecimiento de la demanda de potencia y energía tiene afectaciones de consideración para los escenarios en los que la demanda nacional crece en menor medida, sin embargo, se encontró que el parque generador actual, así como la nueva generación contratada a través de la PEG-4-2022 es suficiente para satisfacer el incremento de la demanda. Si a esta generación se suma la generación proveniente de las plantas

candidatas establecidas por el MEM en su plan indicativo del sistema de generación, el resultado de la factibilidad de satisfacer el crecimiento es mayor.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La movilidad eléctrica es una tendencia mundial que surge como respuesta al cambio climático relacionado con el uso irresponsable de los recursos naturales y el consumo excesivo de combustibles fósiles. Varios países de la región han iniciado una sólida transición hacia la movilidad eléctrica a través de herramientas como beneficios fiscales, tarifas diferenciadas y bonos de carbón. Sin embargo, la transición hacia la movilidad eléctrica presenta obstáculos propios de una tecnología en etapa de desarrollo, como la desconfianza de los usuarios, precios altos, falta de infraestructura, entre otros. Factores que influyen en este proceso son la necesidad de un marco regulatorio claro y accesible a los interesados, políticas públicas adecuadas e infraestructura de carga eléctrica pública.

Actualmente en el país no existe una red de carga vehicular que permita la implementación de la movilidad eléctrica a gran escala, solamente se cuenta con proyectos aislados realizados por iniciativa propia de hoteles, centros comerciales y universidades. Sin embargo, tomando en cuenta que tanto fabricantes como gobiernos se han impuesto metas respecto a migrar hacia esta nueva tecnología y que en Guatemala cobró vigencia la Ley de incentivos para la movilidad eléctrica, surge la necesidad de determinar la factibilidad técnica de una red de recarga vehicular pública en el país y sus implicaciones para el sistema nacional interconectado y para el mercado mayorista de energía.

- Descripción del problema

Guatemala no cuenta con una infraestructura de carga vehicular de acceso público, no tiene un marco regulatorio para los interesados en la construcción de nuevos puestos de carga y tampoco cuenta con incentivos o bonos para los interesados en comercializar vehículos eléctricos. La permanencia en el uso del vehículo convencional que utiliza derivados del petróleo como combustible implica contaminación ambiental y baja eficiencia energética. Realizando una comparación entre el uso del vehículo convencional y el vehículo eléctrico se encuentra que al continuar con el uso del vehículo convencional se desaprovecha el potencial energético que se tiene en Guatemala desde fuentes renovables. El incremento de la demanda debido a los vehículos eléctricos puede propiciar más inversión en generación de energía eléctrica en el país, adicional a la que ya se tiene planificada y que es en un 75 % energía proveniente de fuentes renovables (MEM, 2022).

Algunos grandes fabricantes de vehículos han establecido que no fabricarán más vehículos de combustión interna e iniciarán una transición progresiva a la fabricación de únicamente vehículos eléctricos, esto significa que en un horizonte de 10 años el país tendrá que estar preparado para este cambio de tecnología que ya es más notable en otros países de la región. Además, países en Europa han propuesto prohibir la venta de vehículos de combustión interna a partir de 2035 (Martin, 2021).

Estos factores obligan al desarrollo de infraestructura y normativas que faciliten la transición. Este estudio se fundamenta en que la infraestructura de carga es un factor relevante para la adaptación de esta nueva tecnología ante escenarios de penetración vehicular que estudios previos han determinado para Guatemala.

Según datos de la Superintendencia de Administración Tributaria (s. f.) el parque actual (hasta agosto 2021) de vehículos de CI en el país es de 4,316,824. Esto implica altos niveles de contaminación y de uso ineficiente de la energía tal como lo indica el Ministerio de Energía y Minas (2017b) “los vehículos de gasolina de uso particular requieren un consumo aproximado de 1.92 galones de gasolina por recorrer 100 kilómetros dentro de zonas urbanas, lo que equivale a 68.22 kWh a una velocidad promedio de 60 Km/h” (p. 84). Este consumo de energía está muy por arriba del consumo de un vehículo eléctrico, de hecho, para las tecnologías presentes en el mercado guatemalteco, MEM (2017b) estima que el consumo para la misma velocidad promedio y distancia es de 1.44 kWh, es decir que se requiere aproximadamente 48 % menos energía para realizar el mismo trabajo.

El alto costo del transporte y la dependencia del mercado del petróleo impacta directamente en los precios de elementos de la canasta básica que deben ser distribuidos por vehículos pick up y camiones, es por ello por lo que ante un alza de los combustibles es común que se eleven los precios de los productos, de los fletes e incluso del transporte público.

No obstante, debe tomarse en cuenta que el cambio tecnológico en la movilidad será un proceso que dependa de variables económicas, políticas y ambientales. Aunque exista una relación entre la cantidad de estaciones de recarga eléctrica pública y el crecimiento del parque vehicular, debe tomarse en cuenta variables como la autonomía de las baterías y la capacidad de la red para soportar cargas lentas y rápidas en especial en sitios donde el desarrollo económico o turístico no ha ido de la mano con el desarrollo de las redes de transmisión y distribución.

- Formulación del problema

El problema se aborda planteando una pregunta central y cuatro preguntas auxiliares que sirven de guía para la resolución de este.

- Pregunta central

- ¿Es factible técnicamente la construcción de una red de carga vehicular pública en Guatemala y cuáles son los impactos que esta tendría en el sistema nacional interconectado?

- Preguntas auxiliares

- ¿Cuántas estaciones de carga pública son necesarias para satisfacer el crecimiento del parque de vehículos eléctricos en el país?
- ¿Qué escenarios de demanda de potencia y energía se pueden presentar ante la probabilidad de distintos requerimientos de carga a lo largo del día?
- ¿Cuánta demanda de total potencia y energía se tendría en el país debido a la construcción de una red de carga pública para vehículos eléctricos?
- ¿Existen nodos eléctricos o líneas de transmisión en el sistema nacional interconectado que puedan no soportar el

aumento de demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos?

- Delimitación del problema

El problema abordado analiza la situación de la infraestructura de carga para propiciar la movilidad eléctrica en Guatemala en el período que comprende desde el 2023 hasta el 2037. Se utilizan las proyecciones realizadas por el Ministerio de Energía y Minas, así como modelos matemáticos basados en el crecimiento histórico del parque de vehículos eléctricos en países de la región y datos estadísticos que maneja el Administrador del Mercado Mayorista como fuentes primarias de adquisición de datos. El análisis se realiza considerando el crecimiento del parque de vehículos eléctricos en el país y las necesidades que este crecimiento supone, como nueva infraestructura de carga y un mayor suministro de energía y potencia al sistema. El estudio se centra tanto en la ciudad de Guatemala como en los departamentos del interior del país, sin embargo, se tiene mayor énfasis en la ciudad capital por concentrar el mayor tránsito vehicular.

OBJETIVOS

General

Determinar la factibilidad técnica de la construcción de una red de carga pública para vehículos eléctricos en Guatemala y cuáles son los impactos que esta tendría en el sistema nacional interconectado.

Específicos

1. Determinar la cantidad apropiada de estaciones de carga pública según el crecimiento del parque de vehículos eléctricos y los parámetros asociados a la movilidad en el país.
2. Estimar la demanda de potencia y energía que se puede presentar en un día ante distintos requerimientos de carga vehicular eléctrica proveniente de estaciones públicas.
3. Establecer el incremento total de la demanda de potencia y energía que se tendrá debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos.
4. Determinar si existen nodos eléctricos o líneas de transmisión en el sistema nacional interconectado que puedan no soportar el aumento de demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El diseño del estudio que se abordó fue de tipo no experimental debido a que no se tuvo control sobre las variables de investigación. El enfoque del estudio fue cuantitativo porque se analizaron variables numéricas mediante herramientas estadísticas para determinar una cantidad apropiada de centros de recarga pública para vehículos eléctricos, así como el crecimiento de este número para el período de estudio. También se determinó la demanda de potencia y energía debido a dichos puntos. Por último, mediante datos numéricos de cargabilidad y regulación de tensión se establecieron ubicaciones con alta probabilidad de falla debido al incremento de demanda.

El alcance del estudio fue descriptivo-correlacional debido a que se estableció un modelo de crecimiento basado en la correlación de dos variables, el PIB y la población de los países que forman parte del estudio. Cada modelo presente en este estudio permitió describir los impactos que se tendrán en el SNI debido a la recarga vehicular pública.

La unidad de análisis que se abordó en el estudio es la infraestructura de recarga pública para vehículos eléctricos, esta tiene propiedades como ubicación, demanda de potencia y energía, número de cargadores y tipo de carga. Las principales variables que se estudiaron fueron la demanda de potencia y energía, cantidad de vehículos, PIB, población y tipo de vivienda.

Las fases de estudio se presentan a continuación:

- Fase 1: exploración bibliográfica.

- Fase 2: creación de un modelo de crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala para el periodo 2022-2037.
- Fase 3: determinación de una cantidad apropiada de estaciones de recarga pública para vehículos eléctricos.
- Fase 4: determinación de la demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos en el periodo 2022-2037.
- Fase 5: determinación del impacto de la recarga vehicular pública en el sistema nacional interconectado.
- Fase 6: ubicación de nodos y líneas con problemas de cargabilidad y/o regulación de tensión.

Las técnicas de análisis de información que se utilizaron fueron: medidas de tendencia central, medidas de variabilidad, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se encuentra dentro de la línea de investigación nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica, en el subtema análisis e impactos de la innovación tecnológica. Esto debido a que la movilidad eléctrica es una tecnología que en Guatemala y en la región aún se encuentra en una etapa temprana de madurez, pero que se prevé que en los próximos años la cuota de mercado vaya en aumento y con ello la demanda de potencia y energía para el sistema de transporte y generación.

Estudios previos han mostrado que existe una relación entre la cantidad de vehículos que se comercian y la cantidad de estaciones de recarga pública que existen en una determinada zona o país, es por ello por lo que el despliegue de una red de carga pública se considera importante para la adopción de vehículos eléctricos. Sin embargo, es de considerar que una red de carga pública implica un aumento en la demanda de potencia y energía al sistema a mediano y largo plazo. Este estudio se basa en la consideración de que es importante determinar si es factible técnicamente para el sistema nacional interconectado satisfacer esta nueva demanda. Para dar solución al problema de investigación el trabajo fue estructurado en seis etapas de investigación y dividido en capítulos que se explican a continuación.

El capítulo uno brinda al lector un marco de referencia basado en los estudios previos que se han realizado en la línea de lo que la investigación aborda, en estos estudios se presenta el estado actual de la infraestructura de carga pública en el mundo y su relación con el número de vehículos eléctricos,

también se presenta un estudio previo que analiza la demanda de energía debido a carga de vehículos en espacios residenciales.

El capítulo dos presenta los conceptos básicos para comprender la movilidad eléctrica, los tipos de vehículos, tipos de carga y tipos de conectores, así como la forma en la que la movilidad eléctrica se ha desarrollado en el país y en el mundo. También se presentan factores indicativos que luego serán utilizados en el desarrollo de la investigación.

El tercer capítulo muestra a detalle el proceso metodológico que se siguió en la investigación. Se presenta el enfoque, el alcance y el diseño del estudio, se explica paso a paso la forma en la que se recabaron los datos y el proceso lógico que se siguió para presentarlos de tal forma que pudieran dar respuesta a las preguntas de investigación.

El capítulo cuatro resume los resultados encontrados a lo largo de la investigación y condensa toda la información considerada de relevancia luego de ser analizada por distintos métodos estadísticos.

Por último, se presenta un análisis teórico basado en los resultados mostrados en el capítulo anterior. La forma en la que se discute los resultados obtenidos es mediante argumentos que dan respuesta a las preguntas de investigación. Una vez se han planteado los puntos relevantes de cada resultado se da una respuesta concreta y resumida a cada pregunta de investigación.

1. MARCO REFERENCIAL

El objetivo del marco referencial fue recopilar estudios que permitieran tener una idea clara sobre el estado de la tecnología de la movilidad eléctrica a nivel global y también a nivel nacional.

1.1. Antecedentes

Hall y Lutsey (2020) realizaron una recopilación de estudios sobre el incremento de vehículos eléctricos de uso común y el crecimiento de la infraestructura de carga eléctrica asociado a estos. Analizan investigaciones y tendencias en los mercados más grandes de vehículos eléctricos. Los países analizados incluyen Estados Unidos, países de Europa y China. Se identifican relaciones entre la tasa de crecimiento de la red de carga y el crecimiento del parque vehicular. También se analiza el tipo de ciudad y cómo con base en sus requerimientos particulares se debe desarrollar una red de carga pública (pública se refiere a que es de acceso abierto a la población, puede ser de inversión estatal o privada). Estas características incluyen el tipo de residencia más común, la densidad poblacional, la cantidad de kilómetros desplazados normalmente, entre otros. Por otro lado, indica costos promedio de inversión basado en la información de algunos países que forman parte del estudio. También brinda información relevante en cuanto al consumo de potencia que demandan los diferentes tipos de cargadores que se tiene en el sistema. Los parámetros que relacionan la cantidad de vehículos eléctricos por estación de carga pública, entre otros, son relevantes para el presente estudio pues definen guías sobre las cuales se apoya el presente estudio.

Anaya (2018) realiza una estimación del crecimiento del parque de vehículos eléctricos para Guatemala con tres posibles escenarios que establece como pesimista, optimista y promedio, esta estimación la realiza para un período de 13 años entre 2017 y 2030 en las que establece como principales factores los incentivos gubernamentales como exoneración del cobro de importación y tarifas preferenciales para la recarga vehicular, la variación de los precios de los PHEV y EV y la variación de los precios de las baterías para vehículos eléctricos. Una vez establecidos estos factores los compara con el crecimiento del mercado de vehículos de combustión interna tomado en el mismo periodo. La estimación del crecimiento del parque de vehículos de combustión interna se realiza considerando la tasa promedio de crecimiento de vehículos importados durante el periodo 2007-2016. La penetración del vehículo eléctrico y del vehículo híbrido enchufable es un factor determinante para la estimación de la red de carga adecuada que se abordará en el estudio.

Mazariegos (2021) realiza una evaluación de la red de distribución de la ciudad de Guatemala, a partir de lo cual determina que “los usuarios de la tarifa Baja Tensión Simple de vehículos eléctricos podrían ver hasta 168.72 kWh de aumento en su consumo mensual, y un incremento de la demanda de hasta 7.4 kW” (p. 71). Además, evalúa los escenarios más críticos “bajo premisas y supuestos planteados, mediante los cuales se determinó que la recarga de los automóviles eléctricos durante la banda valle de la curva de demanda del SNI es la que más beneficios trae al sistema” (Mazariegos, 2021, p. 75).

El estudio se desarrolló con un enfoque cuantitativo haciendo uso de medidas de tendencia central con lo que se establecieron pautas de comportamiento para la evaluación de la red de distribución y se usaron los valores promedio de consumo de los usuarios BTS, para evaluar en qué medida se ve afectada la curva de carga al implementarse la movilidad eléctrica. En un

escenario crítico donde el 100 % de los vehículos y motocicletas se conectan a la red de distribución se estima un aumento en la demanda de energía de 3.056 GWh para un día. La investigación es utilizada como marco referencial respecto al consumo de potencia y energía de vehículos eléctricos para el presente estudio (Mazariegos, 2021).

Hinestroza (2014) formula un marco regulatorio que garantice la integración óptima de EVs con el sector eléctrico en la ciudad de Bogotá definiendo requerimientos de regulaciones técnicas e incentivos que permitan su introducción masiva, el estudio evalúa la percepción de los habitantes de la ciudad por medio de una encuesta cuyos resultados luego son utilizados para establecer un modelo de predicción estadística de la masificación de EVs tomando también como factores el panorama nacional e internacional de la movilidad eléctrica.

Se concluye que “es necesario establecer una estandarización de los niveles de carga y tipos de conectores asociados a los EVs entrantes al país. Esto permite garantizar la interoperabilidad entre los vehículos de diferentes marcas y la instalación de infraestructura en cualquier ciudad” (Hinestroza, 2014, p. 124). Además, indica la importancia de establecer una normativa que defina requerimientos de instalación y operación para los sistemas de recarga. La información que es presentada en el estudio respecto a los diferentes tipos de cargador y modo de carga son relevantes para la investigación.

Tsakalidis, Julea y Thiel (2019) realizan una evaluación del estado de la electrificación del transporte en Europa analizando el estado de políticas relevantes, incentivos y planes nacionales respecto a esta nueva tecnología. Los resultados muestran que los planes de adopción de vehículos eléctricos y el correspondiente crecimiento de una red de carga vehicular varía

significativamente entre los países. Las ventas en los países analizados variaron en 2017 entre 0.01 % a 5.49 % y estimaron que podría aumentar a entre 0.05 % y 12.71 % en 2020. Asimismo, encontraron que el rango de vehículos eléctricos por estación pública estuvo en 2017 entre 1 y 60 y estimaron que estaría entre 3 y 161 en 2020. Los autores hacen un recuento de distintas fuentes para estimar un rango de vehículos eléctricos por estación de recarga, sus fuentes incluyeron investigaciones en China, Estados Unidos y Europa. El resultado encontrado fue de un rango de entre 7 y 27. Este rango es utilizado en la presente investigación para estimar el crecimiento de las estaciones de recarga pública en Guatemala.

2. MARCO TEÓRICO

Para fundamentar el presente estudio se definirán conceptos relacionados con los vehículos eléctricos y las estaciones de recarga pública, fundamento teórico que proporcione al lector la información necesaria para comprender los datos que se presentan y manipulan en el desarrollo de la investigación. Algunos conceptos importantes son las capacidades de las baterías de los vehículos actuales, la demanda de potencia y energía de una estación de carga, las relaciones vehículos eléctricos por estación de carga pública, crecimiento del parque de vehículos eléctricos en el mundo y la región, entre otros.

2.1. Vehículo eléctrico

La movilidad eléctrica será abordada en este estudio como la tecnología utilizada para el transporte de personas, bienes y servicios utilizando motores eléctricos y dispositivos de almacenamiento de energía, incluyendo motocicletas, vehículos sedán, pickups, camionetas, camionetillas, furgonetas, buses y camiones. Este transporte es entre y dentro de ciudades urbanas y poblaciones rurales. Dickerman y Harrison citados por Morro-Mello, Padilha-Feltrin y Melo (2017) indican que la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero es una alternativa para reducir daños al medio ambiente; para contener esta emisión de gases se han implementado avances tecnológicos como el uso de vehículos eléctricos (EVs) en zonas urbanas, los cuales requieren menos mantenimiento y no producen polución. La movilidad eléctrica ha recibido más atención recientemente y se ha experimentado un drástico incremento en sus ventas. Según la International Energy Agency (citado por Fluchs, 2020) “en 2018 el *stock* global de vehículos eléctricos sobrepasó los 5.1 millones, mientras que

únicamente cerca del 40 %, es decir 2 millones de vehículos habían sido vendidos en los años previos” (p. 1).

Asimismo, un caso cercano a Guatemala se observa en Costa Rica, donde “la inscripción de carros eléctricos creció un 77 % y 36 % en el segmento de motos y equipo especial” (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021, p. 16).

“Los vehículos eléctricos son reconocidos como la tecnología más factible para la descarbonización del transporte de pasajeros, particularmente cuando su recarga proviene de sistemas de potencia con baja emisión de CO₂” (Zarazua, Noel, Kester y Sovacool, 2019, p. 1).

Las ventajas que presentan este tipo de vehículos entre otras son una mayor eficiencia, menores requerimientos de mantenimiento, prácticamente nula emisión de ruido y bajas e incluso cero emisiones de gases contaminantes dependiendo del tipo de vehículo eléctrico. Ros y Barrera (2017) realizan una clasificación de los diferentes tipos de vehículos eléctricos en función del grado de electrificación, estos tipos de vehículos se resumen en la tabla I. Sin embargo, en este trabajo se definirán únicamente los vehículos eléctricos que requieren una conexión eléctrica de recarga y se dejan en segundo plano los vehículos cuyo motor eléctrico funciona como soporte del motor de combustión interna.

2.1.1. Vehículo eléctrico de baterías

Según Torres (2015) un vehículo eléctrico es aquel que se alimenta 100 % por un sistema de baterías recargables y utiliza la energía química almacenada en ellas para alimentar uno o varios motores eléctricos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica y producen un movimiento.

Tabla I. **Clasificación de vehículos según el grado de electrificación**

Clasificación ISO	Características generales
μ HEV (<i>micro hybrid electric vehicle</i>)	• Incorpora placa solar fotovoltaica, sistema Stop & Star, KERS de alternador. • No superan los 5 kW de potencia. • No incorporan ningún sistema de tracción eléctrica.
mHEV (<i>mild hybrid electric vehicle</i>)	• Incorpora un sistema de tracción eléctrico que no supera los 15 kW de potencia. • Incorpora KERS • 24-48V • El motor de arranque convencional es sustituido por un motor eléctrico con mayor potencia.
HEV (<i>hybrid electric vehicle</i>)	• Incorpora KERS • Incorpora un sistema de tracción eléctrica que supera los 15 kW de potencia.
PHEV (<i>plug-in hybrid electric vehicle</i>)	• Es un vehículo híbrido que además dispone de un Sistema de carga exterior que permite conectarlo a la red eléctrica.
REEV (<i>range extended electric vehicle</i>)	• Incorpora un sistema de tracción eléctrica que supera los 15 kW de potencia. • Incorpora KERS. • Son enchufables.
FCEV (<i>fuel cell electric vehicle</i>)	• Incorpora un sistema de tracción eléctrica que supera los 15 kW de potencia. • Incorpora KERS. • Incorpora un depósito y una instalación de hidrógeno a alta presión.
EV (<i>electric vehicle</i>)	• Incorpora un sistema de tracción eléctrica que supone toda la tracción del vehículo. • Incorpora KERS. • Son enchufables

Fuente: elaboración propia, con datos de Ros y Barrera (2017). *Vehículos Eléctricos e Híbridos*.

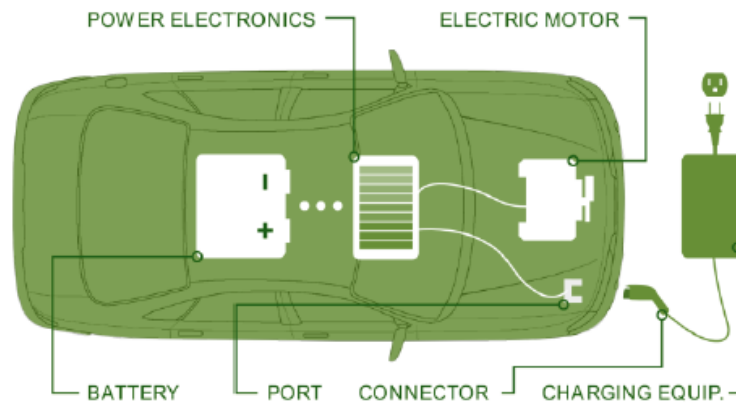
Las baterías del vehículo se pueden cargar de dos maneras de acuerdo con la tecnología de la cual dispone cada vehículo, estas son: conectadas a una red eléctrica o utilizando freno regenerativo. La autonomía de este tipo de vehículos eléctricos ha ido en aumento en los últimos años, uno de los vehículos con mayor capacidad en este rubro es el Tesla Model S que cuenta con 652 km de autonomía. Aunque existen otros vehículos con autonomías similares estos son vehículos de precio elevado.

Según Mazariegos (2021):

Los EVs pueden llegar a tener una autonomía de alrededor de 300 kilómetros cuando están totalmente cargados, aunque esta autonomía depende de algunos factores como tipo de ruta, tráfico y habilidades del conductor. Este tipo de vehículo es el de mayor requerimiento para la red eléctrica. (p. 9)

Singh (2021) segmentan los vehículos eléctricos en función de las especificaciones de sus baterías cuyas capacidades van desde 1.2 kWh en el caso de vehículos de dos ruedas como motocicletas hasta 80 kWh para vehículos eléctricos de segunda generación.

Figura 1. **Vehículo eléctrico de baterías**



Fuente: Vermont Energy Investment Corporation (2014). *Electric Vehicle Charging Station Guidebook Planning for Installation and Operation*.

2.1.2. **Vehículo híbrido enchufable**

Hinestroza (2014) indica que un vehículo híbrido enchufable utiliza como fuente de energía un conjunto de baterías que alimentan un motor eléctrico y un combustible fósil que alimenta un motor de combustión interna. Estos son capaces de operar únicamente con energía eléctrica a cierta distancia y luego son auxiliados por el motor de CI. “La batería de los PHEV-10 como el Toyota Prius Plgu-in tienen una autonomía aproximada de 10 millas, mientras que un PHEV-40 como el Chevrolet Volt tiene una autonomía aproximada de 40 millas” (Vermont Electric Investment Corporation, 2014, p. 7).

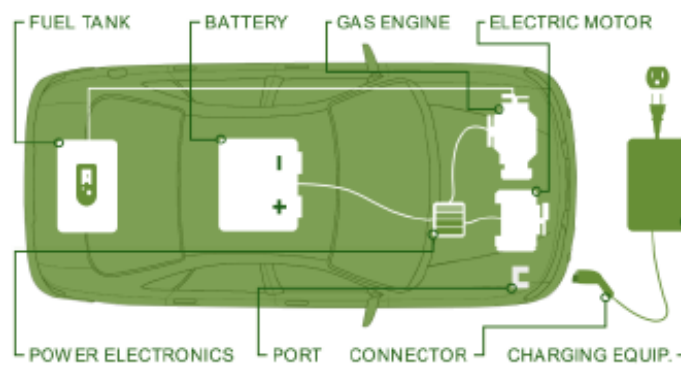
Los PHEVs tienen dos posibles configuraciones de diseño en función de la forma en la que controlan el movimiento de las llantas del vehículo utilizando los dos motores que posee. “La configuración en paralelo conecta el MCI y el motor eléctrico a las llantas a través de un acople mecánico y en el que ambos pueden controlar y manejar las llantas directamente” (Hinestroza, 2014, p. 19).

El control que se tiene en un trayecto depende de si las baterías están cargadas o descargadas o de la configuración propia del vehículo según la marca y la tecnología desarrollada. “La configuración en serie utiliza solo el motor eléctrico para manejar las llantas y el MCI se utiliza para alimentar el motor eléctrico” (Hinestroza, 2014, p. 19).

2.1.3. Vehículo eléctrico de rango extendido

Un vehículo eléctrico de rango extendido es un vehículo 100 % eléctrico que está equipado con un grupo electrógeno de respaldo (Unidad auxiliar de potencia APU) que puede ser un motor de CI a gasolina. Es decir que el motor de CI no suministra propulsión directa al vehículo, únicamente es utilizado para cargar la batería. El grupo Range Extender o REX entra en funcionamiento automáticamente al descender el nivel de carga de las baterías por debajo de un umbral establecido o a voluntad del conductor (Silva, 2016).

Figura 2. Vehículo híbrido enchufable



Fuente: Vermont Energy Investment Corporation (2014). *Electric Vehicle Charging Station Guidebook Planning for Installation and Operation*.

2.1.4. Autonomía del vehículo eléctrico

La autonomía del vehículo eléctrico es la cantidad de kilómetros que puede desplazarse con una carga total de la batería, La autonomía depende de la capacidad de la batería y de la energía que se añade al utilizar frenos regenerativos. La autonomía de los vehículos eléctricos ha ido en aumento, en especial con el uso de baterías de ion de litio.

La asociación de automóviles de Noruega -NAF- realizó un ensayo para poner a prueba la autonomía de vehículos de diferentes segmentos y precios. Los resultados obtenidos dejan un margen de autonomía de entre 165 y 654.9 km. La prueba incluye fabricantes europeos, estadounidenses y asiáticos (Amadoz, 2021).

En Guatemala se realizó una prueba similar con el vehículo Nissan Maxus EV30 con una batería de 35 kWh con autonomía de entre 158 y 210 kilómetros, la prueba se realizó en un ambiente urbano y en carretera, también se puso a prueba el freno regenerativo y su capacidad para sumar kilómetros eléctricos con esta tecnología. En la prueba se recorrieron 114 kilómetros y consumiendo un 46 % de la carga.

Otro caso similar aplicado en Guatemala es el del vehículo comercial JAC N55 que tiene 2 baterías de ion de litio y que tiene una autonomía de hasta 220 kilómetros, el vehículo en cuestión fue adquirido por una empresa de bebidas carbonatadas y se encuentra actualmente en circulación (Asociación de Movilidad Eléctrica de Guatemala, 2021).

2.2. Infraestructura de carga vehicular

El crecimiento de la infraestructura de carga vehicular de acceso público en conjunto con la construcción de puestos de carga privados y compartidos por pequeñas comunidades como edificio de apartamentos y edificio de oficinas es fundamental para que el vehículo eléctrico pueda ser una tecnología competitiva con el motor de combustión interna. En el mercado actual existen diversos modos de carga en función de la capacidad de las baterías y a su vez existen cargadores que se adaptan a estos modos. Entre los aspectos que se deben tomar en cuenta para la construcción de un puesto de carga se debe considerar el espacio físico, la capacidad de la línea de distribución más cercana y el nivel de carga que se va a manejar (Morro-Mello *et. al.*, 2017).

2.2.1. Tipos de carga

Los tipos de recarga de vehículo son una división en función de la capacidad de la batería del vehículo, el conector y el nivel de voltaje al que se está conectado al cargador. Dependiendo del vehículo, éste tendrá capacidad de utilizar uno o más tipos de recarga.

2.2.1.1. Carga lenta

Según Goenaga (2020), es el tipo de recarga más simple, no requiere de un diseño específico ni de infraestructura adicional a la que se encuentra en casa, la norma IEC-61851-1 clasifica este tipo de recarga como carga modo 1, no cuenta con protecciones específicas ni protocolos de comunicación.

Es un tipo de carga para conexiones residenciales o comerciales en los que el tiempo disponible para recarga es amplio, pues, según la batería que se tenga los tiempos de carga van desde 5 hasta 10 horas (Mazariegos, 2021).

Con una carga que requiere entre 15 y 20 amperios de la red, y una potencia demandada que no supera los 2.3 kW. Es idealmente utilizada para motos, triciclos o en general cualquier vehículo de poca potencia (Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, 2014).

Las ventajas que presenta este tipo de carga es un bajo costo de instalación y prácticamente nula incidencia en el pico de carga del usuario, sin embargo, su tiempo prolongado de recarga representa una desventaja cuando se tienen vehículos de mayor demanda.

2.2.1.2. Carga normal

Es un tipo de recarga similar al de carga lenta porque se conecta directamente a un tomacorriente que se tenga en casa, con una diferencia, Vermont Energy Investment Corporation (2014) indica que los EVs están equipados con equipos portátiles de carga lenta para ser conectados a un tomacorriente de uso normal, este equipo es como el que se muestra en la figura 6, y añade protecciones que no se tienen al conectarse directamente al tomacorriente, también añade comunicación que permite limitar la corriente que se demanda en función de los requerimientos de la red, esto debido a que el tomacorriente puede formar parte de un circuito con más cargas.

La potencia y corriente demandada es bastante similar al de carga lenta, del mismo modo comparten ventajas y desventajas. La norma IEC-61851-1 identifica este tipo de carga como carga modo 2 (Goenaga, 2020).

Figura 3. **Modo de carga tipo 2 o normal**



Fuente: Hall y Lutsey (2020) *Electric Vehicle Charging guide for cities*.

Vermont Energy Investment Corporation (2014) indica que “para un vehículo con autonomía de entre 60 y 80 millas, se requiere de 10 a 14 horas de recarga utilizando carga lenta” (p. 9). En este caso para un usuario de tarifa de baja tensión simple conectado a la red de EEGSA implicaría un costo de Q. 17.25 por una recarga completa utilizando el pliego tarifario de julio 2021(CNEE, s. f.).

Hall y Lutsey (2020) indican que el precio del equipo para recarga lenta, en caso de que no sea proporcionado con el vehículo es de entre € 200 y € 700 y el costo de instalación desde €0, cuando el tomacorriente ya está disponible y hasta €500 en función de la localización de la salida de fuerza.

2.2.1.3. Carga semi rápida

Es un tipo de recarga que se realiza con corriente alterna, pero con mayores demandas de potencia de la red, puede realizarse con corriente monofásica de 208/240 voltios o con una red trifásica, la potencia de la recarga se encuentra entre 7 y 43 kW (Hall y Lutsey, 2020).

Es un tipo de recarga utilizado en lugares donde los vehículos permanecen estacionados por unas horas como en un gimnasio, un centro comercial o un parque. Este tipo de recarga dispone de protecciones eléctricas y un tipo de conector específico para su conexión, Fundación de la energía de la comunidad de Madrid (2014) indica que el conector tiene como funciones “la verificación de una correcta conexión, comprobación continua de la toma de tierra, activación/desactivación de la carga y selección de la potencia de la carga en función de las necesidades del vehículo” (p. 124). Este tipo de conexión reduce los tiempos de recarga, y para su conexión actualmente se utilizan 2 tipos de conectores el tipo 1 y el tipo 2. El tipo de conector que se utilizará depende del vehículo y del país donde fue fabricado, aunque existe una tendencia a la estandarización, es posible encontrar ambos tipos de conectores. El caso de Tesla es particular pues este fabricante produce sus propios conectores.

Vermont Energy Investment Corporation (2014) indica algunas desventajas que tiene este tipo de carga como un costo elevado de instalación y un mayor impacto en la curva de demanda de la red a la que está conectada la instalación.

La norma IEC-61851-1 identifica este tipo de carga como modo 3 y será de importancia para el presente estudio por ser un tipo de carga utilizado en vías públicas (Goenaga, 2020).

Figura 4. **Modo de carga tipo 3 o carga semi rápida**



Fuente: Hall y Lutsey (2020) *Electric Vehicle Charging guide for cities*.

2.2.1.4. Carga rápida

El modo de carga rápida es el más parecido a la recarga de combustible que se tiene para vehículos de combustión interna, al igual que una gasolinera, este tipo de carga está presente en electrolineras y tienen tiempos de carga menores a los anteriores, tiene como fin una recarga del 70 % en como máximo 30 minutos, por lo que sus requerimientos energéticos son más amplios. La recarga se realiza en corriente directa y con cuatro posibles conectores, el CHAdeMO, el CCS1, el CCS2 o Combo 2, y el conector para Tesla. La potencia que demanda este tipo de carga es entre 50 y 350 kW según Hall y Lutsey (2020) y entre 50 y 200 kW según Singh (2021). La norma IEC-61851-1 identifica este modo de carga como modo 4 (Goenaga, 2020).

Aunque presenta tiempos cortos de recarga, la desventaja de este tipo de carga es el alto costo de la infraestructura de carga y debido a sus niveles de corriente y tensión posee mayores requerimientos de seguridad. Además, no es un tipo de recarga que sea aplicado a todos los vehículos disponibles, pues depende de la capacidad de sus baterías.

2.2.2. Tipos de conectores

Los modos de carga que requieren conectores son los tipos 3 y 4, los del modo 3 son para conexión en AC y los del modo 4 son para conexión en DC, el modo de carga tipo 2 requiere una conexión normal y el tipo de cargador ya viene incluido en el vehículo y por ello no se describe a continuación.

2.2.2.1. Modo 3

Para este tipo de recarga se utiliza el conector J1772 (tipo 1) que es un conector para corriente monofásica de 120 o 208/240 V, con corrientes de hasta 32 amperios y el tipo 2 (Mennekes) que es para corriente trifásica de 208/240 o 480V, con corrientes de hasta 32 amperios, el primero es de uso normal en EE. UU. y Japón, mientras que el segundo es de uso más común en Europa (Goenaga, 2020).

2.2.2.2. Modo 4

Para este tipo de recarga se dispone de los conectores CHAdeMO que utilizan una tensión nominal de 500 Vdc y una corriente de hasta 125 amperios, los conectores tipo CCS combo 1 y CCS combo 2, que son conectores tipo 1 y tipo 2 respectivamente a los que se añaden 2 pines extras que permiten realizar

una carga rápida en DC, manejan tensiones de hasta 920 Vdc y corrientes de entre 250 y 500 amperios (Goenaga, 2020).

2.2.3. Tipos de infraestructura de carga

Una vez se tiene en cuenta los tipos de recarga que existen para vehículos eléctricos es necesario determinar cuáles son las zonas más adecuadas para su instalación. Esta elección dependerá del tipo de usuario, del tipo de movilidad presente en una zona y de los horarios de movilidad que se manejan, es por ello por lo que algunos autores hacen una diferenciación entre los posibles sitios para recarga de vehículos.

2.2.3.1. Instalaciones de carga residencial

Este tipo de recarga es el más económico para el dueño de un vehículo eléctrico ya que utiliza modos de carga tipo 2 con conectores tipo 1 o tipo 2 según el nivel de voltaje que se tenga (120 V o 208/240 V), no representa un consumo elevado de corriente por lo que no suele incidir en gran medida en la curva de carga del usuario. Es un tipo de carga muy favorable cuando se tiene tarifa diferenciada en función de la hora, es por ello que es un tipo de carga que normalmente se utiliza por las noches cuando el dueño del vehículo descansa en casa (Hall y Lutsey, 2020).

Los requerimientos básicos para este tipo de instalación es tener un circuito dedicado con protección diferencial GFCI para protección de las personas (Vermont Energy Investment Corporation, 2014).

2.2.3.2. Instalaciones de carga en puestos de trabajo

El segundo sitio donde más tiempo pasa estacionado un vehículo es el lugar de trabajo, es por esto que este tipo de instalación es importante, algunas empresas y universidades prestan este servicio que puede ser con modos de carga tipo 2 o 3 (Hall y Lutsey, 2020).

2.2.3.3. Instalaciones de carga de acceso público

Hall y Lutsey (2020) indican que es este tipo de carga es la cara más visible de cara a los usuarios interesados en la adquisición de un EV y una parte fundamental en la transición hacia un mercado de movilidad eléctrico popular. Es importante mencionar que este tipo de infraestructura es más fácil de apoyar desde un punto de vista gubernamental, pues, como se ha visto en algunos mercados europeos, son beneficiados con políticas que facilitan su instalación y reducen el riesgo que implica una inversión de este tipo.

Este tipo de instalación utiliza cargas modo 3 y 4 donde los tiempos de recarga son mucho más rápidos y se instalan en lugares donde las personas no pasan mucho tiempo, debido a esto son instalaciones más caras y complejas que las anteriores, ya que además implican medidores, gestores de carga, protección contra intemperie, protección contra vandalismo, entre otros. Aunque es posible utilizar herramientas de gestión, son este tipo de instalaciones las que más requieren de software especializado, que, entre otras cosas, permite conocer el estado de la carga del vehículo, la disponibilidad de las estaciones de carga, el proceso de facturación, entre otras cosas. Este tipo de instalaciones también puede adaptarse a una redes inteligentes o micro redes si se utilizan fuentes renovables como paneles solares y dispositivos de almacenamiento.

2.3. Movilidad eléctrica en Guatemala

En este apartado se aborda el estado actual de la movilidad eléctrica en Guatemala desde la perspectiva gubernamental, indicando los planes nacionales en los que esta tecnología está incluida, las proyecciones que se esperan de esta y las acciones que ya se están desarrollando. El fin de este capítulo es introducir al lector a los centros de carga pública como una tecnología con potencial para cambiar la movilidad en el país.

2.3.1. Planes nacionales

El Ministerio de Energía y Minas es el ente encargado de realizar una planificación a largo plazo en materia de generación, transporte y uso eficiente de la energía, por este motivo se realizan documentos que enumeran todos los objetivos que tiene el país y las acciones que se realizan o realizarán para que estos objetivos sean alcanzados. Pese a que la movilidad eléctrica tal como se conoce actualmente es un término relativamente nuevo en el mundo y lo es aún más en el país, ya se incluye directamente en algunos planes como se muestra a continuación, además, aunque no sea abordado el término en otros planes que se incluirán en esta sección sí existe una relación directa, el caso del plan de generación es un término a considerar dado un escenario de masificación de la movilidad eléctrica en el cual la matriz energética del país es afectada.

2.3.1.1. Política energética 2019-2050

La política energética tiene como fin “fijar los lineamientos de largo plazo que permitan garantizar el suministro de los requerimientos energéticos futuros de forma sostenible y a precios competitivos” (MEM, 2019, p. 18). El informe separa los sectores de consumo en 5 agrupaciones, el sector de importancia para

el presente estudio es el de Movilidad y transporte, mientras que los ejes transversales de acción que tienen implicación directa con la movilidad eléctrica son Eficiencia energética y Desarrollo sostenible, dado que un automóvil eléctrico es más eficiente en todos sus procesos si se compara con un automóvil de combustión interna, y además asegura un desarrollo que minimiza los impactos ambientales, en específico en la reducción de gases de efecto invernadero.

El MEM (2019) indica que “los vehículos de CI que utilizan gasolina como combustible representan la mayor participación del parque vehicular nacional, y se espera que para el año 2050 estén en circulación casi ocho millones de automóviles de este tipo” (p. 33). Esta tendencia considera un crecimiento insignificante de la movilidad eléctrica, así como de los automóviles que utilizan combustibles alternos como el GLP. Este crecimiento del parque vehicular tiene repercusiones ambientales drásticas considerando que son uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero, es por ello por lo que el MEM identifica el uso del vehículo eléctrico como una alternativa viable para un desarrollo sostenible y un sector de transporte más eficiente.

Respecto a los vehículos eléctricos el MEM (2019) indica que “es importante reforzar los mecanismos que viabilicen las opciones de adquisición de vehículos eléctricos con el fin de desplazar combustibles fósiles tradicionales” (p. 38). Para tener una idea más clara, según datos de la Unidad de Planificación Energético Minero es importante señalar que el sector transporte terrestre produjo en 2017 un 53.87 % del total de toneladas de CO₂ equivalente que se produjeron en el país.

MEM (2019) indica otro factor importante a tomar en cuenta en la transición hacia la movilidad eléctrica: la seguridad energética, esto debido a que un parque vehicular que depende de la producción de energía de su propio país

es más estable que uno que depende de un mercado globalizado y volátil del petróleo, en este sentido se tiene que señalar que el concepto es aplicable siempre que la matriz de generación eléctrica esté compuesta fundamentalmente por recursos naturales propios, tal es el caso de Guatemala, que tiene una capacidad instalada de 70.70 % proveniente de fuentes renovables a enero 2021.

De hecho, esta dependencia energética de la movilidad en el país “ha correlacionado el precio del barril del petróleo con una gran cantidad de bienes que deben movilizarse en la canasta básica” (MEM, 2019, p. 49).

Por las razones expuestas anteriormente la política energética 2019-2050 impulsa la transición energética del consumo de gasolina y diésel hacia el uso de electricidad. La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (s.f) dentro del pliego tarifario vigente a agosto 2021 tiene disponible las tarifas Baja tensión horaria con demanda, Baja tensión simple horaria y Media Tensión Horaria con demanda, que podría ser una herramienta para el usuario interesado en la instalación de una red de carga. Este tipo de tarifas forma parte de las acciones que ya se especificaban en la Política Energética del MEM al igual que “el diseño de un marco legal operativo que permita el montaje y operación de centros de recarga para vehículos eléctricos a través de la figura de grandes usuarios distribuidos” (MEM, 2019, p. 53).

2.3.1.2. Plan nacional de energía 2017-2032

El Plan nacional de energía, vigente aún, y en una línea que va en concordancia con la Política Energética 2019-2050, tiene como “fin último reducir los impactos del cambio climático por medio de la disminución de gases de efecto invernadero” (MEM, 2017b, p. 17). Este documento plantea estrategias y objetivos que faciliten la consecución de metas que el gobierno de Guatemala se

ha establecido a partir de su participación en asambleas como la de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, entre otras. Aunque el documento tiene como parte medular la diversificación de la matriz energética y la incorporación de potencia generada de fuentes renovables, menciona algunos datos importantes sobre la movilidad eléctrica y su futuro en el país.

El sector transporte tiene una participación considerable en el consumo energético del país, y debido a que para su operación utiliza principalmente derivados del petróleo, es también uno de los sectores que más emisiones tiene, es por ello por lo que la incorporación de los vehículos eléctricos es una acción planteada en el plan para reducción de GEI. MEM (2017b) realiza una comparación entre el consumo del vehículo de CI y el vehículo eléctrico que refleja la importancia que su adición al mercado guatemalteco, desde el punto de vista de eficiencia energética:

Actualmente, los vehículos de gasolina de uso particular redondean un cilindraje promedio de 1780 CC, requiriendo un consumo aproximado de 1.92 galones de gasolina para recorrer 100 kilómetros dentro de zonas urbanas lo que equivale a 68.22 kWh por cada 100 kilómetros recorridos a una velocidad promedio de 60 km/h. Por otro lado, los vehículos eléctricos que circulan dentro del territorio nacional están demandando una energía promedio de 1.44 kWh por cada 100 kilómetros recorridos a una velocidad promedio de 60 km/h (MEM, 2017b, p. 84).

De hecho, el uso eficiente de la energía por parte de los vehículos eléctricos es una de las ventajas que tiene frente a los vehículos convencionales, y es una eficiencia bastante notable que va en aumento conforme una tecnología se cambia por la otra. Dentro del Plan Nacional de Energía se indican acciones

políticas y fiscales para la adopción de la movilidad eléctrica como incentivos, reducción de impuestos y programas para instalar estaciones de carga de vehículos (MEM, 2017b).

2.3.1.3. Plan nacional de eficiencia energética 2019-2032

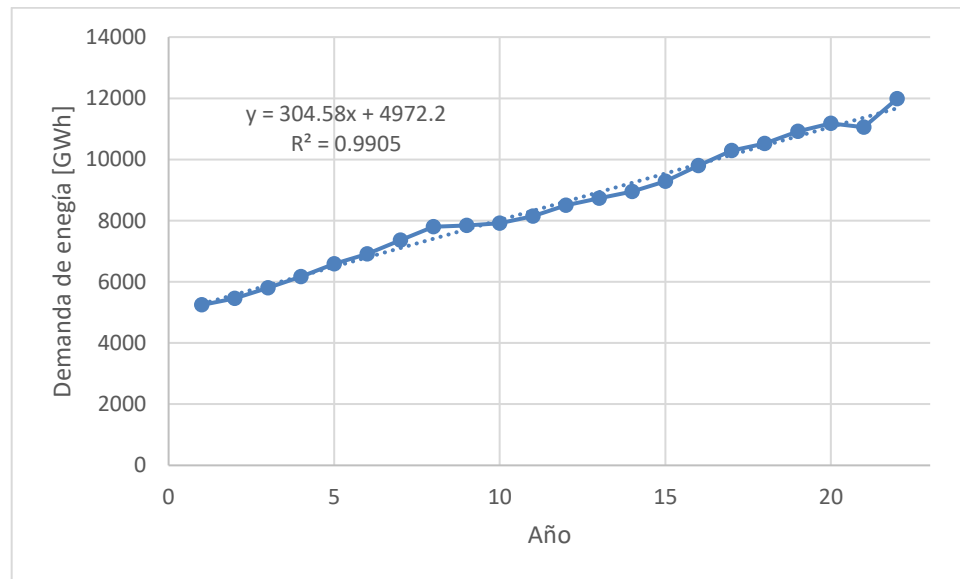
El plan de eficiencia energética aborda objetivos de reducción de la energía utilizada en seis sectores que incluyen el transporte, la industria, el comercio y servicio, entre otros. Dentro de sus ejes de acción, para la movilidad eléctrica es relevante el objetivo de impulsar la inclusión de vehículos eléctricos dado que “son el método más eficiente desde la perspectiva energética para transportar personas en las distintas clasificaciones del sector transporte, puesto que su eficiencia en aprovechamiento de energía consumida es muy elevada” (MEM, 2017a, p. 53).

2.3.2. Estadísticas del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala

En este apartado se aborda el crecimiento histórico de la demanda de energía eléctrica, la demanda máxima de potencia y del parque de generación con el fin de establecer el estado actual del sistema y luego determinar los impactos que se tendrán en este debido a una red de recarga vehicular pública.

El crecimiento histórico de la demanda de energía presenta una tendencia lineal, por lo que se realizó un modelo de correlación, la ecuación y el estadístico R^2 son presentados en la figura 5. El año 1 corresponde al año 2000.

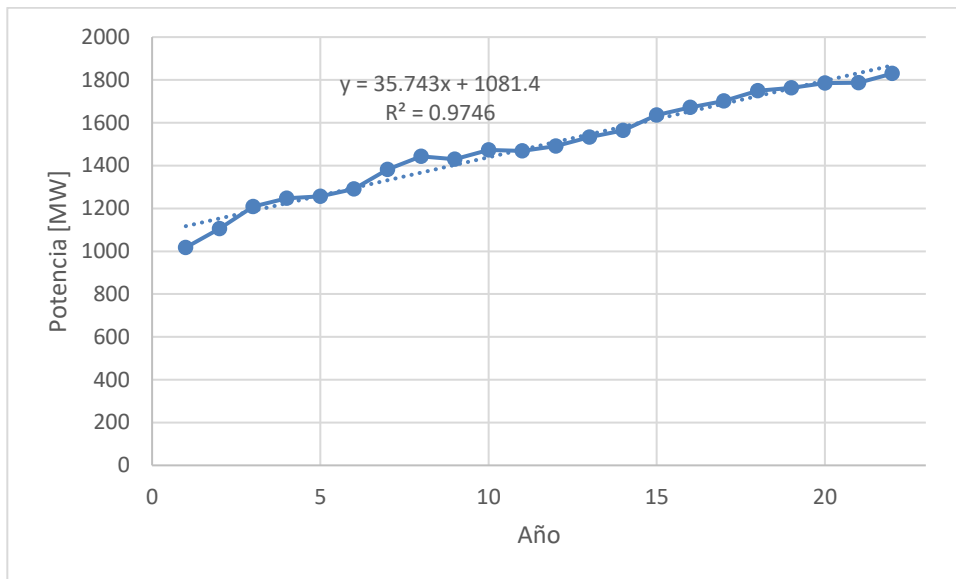
Figura 5. **Crecimiento histórico de la demanda de energía anual en el SNI**



Fuente: elaboración propia, con datos del Administrador del Mercado Mayorista (2022). *Informe estadístico 2021*.

Al igual que para el caso de la demanda de energía anual, el crecimiento histórico de la demanda máxima de potencia presenta una tendencia lineal. El modelo, así como su estadístico R^2 es presentado en la figura 6. El año 1 corresponde al año 2000.

Figura 6. **Crecimiento histórico de la demanda máxima de potencia en el SNI**



Fuente: elaboración propia, con datos del Administrador del Mercado Mayorista (2022). *Informe estadístico 2021*.

2.4. Movilidad eléctrica en mercados internacionales

Se plantea la situación de la movilidad eléctrica desde la perspectiva de algunos países de la región que han iniciado esta transición antes que Guatemala y que por ello tienen escenarios sobre los cuales se puede apoyar la presente investigación. Luego se abordan los casos que se han dado en países donde existen más avances en esta materia y donde la movilidad eléctrica es más generalizada.

2.4.1. Latinoamérica

La movilidad eléctrica como fenómeno tecnológico ha tenido grandes avances en Latinoamérica y su implementación ha crecido con el apoyo del sector público y privado. Los avances incluyen tarifas eléctricas diferenciadas, beneficios fiscales, beneficios para importación de vehículos, normativas específicas, proyectos piloto, entre otros. PNUMA (2021) indica que “a nivel mundial la movilidad eléctrica basada en baterías se ubica entre los niveles 8 y 9 de madurez, mientras que en América Latina y el Caribe, se podría estimar que se ubica entre los niveles 5, 6 y 7” (p. 20). Esto significa que la región tiene un rango de mejora. Esta sección reúne los datos que se tienen disponibles de países de la región y los avances más significativos en materia regulatoria que podrían replicarse en Guatemala.

2.4.1.1. Costa Rica

Costa Rica ha tenido un crecimiento constante del parque de vehículos eléctricos desde 2010 y hasta el mes de julio 2021 se tienen un total acumulado de 4097 vehículos eléctricos de los cuales 2116 son vehículos de uso diario y 717 son motocicletas (Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE], 2021).

Aunque la cantidad de vehículos eléctricos que se encuentran en circulación representan un número relativamente pequeño, el Instituto costarricense de electricidad (ICE) ha instalado estaciones de carga rápida y semi rápida, además en 2018 se promulgó la Ley de Promoción e Incentivos del Transporte Eléctrico (ICE, 2021).

Costa Rica implementó un proyecto denominado Electro-corredor turístico Ruta Eléctrica Monteverde. Esta comunidad, sitio turístico importante del país,

instaló cargadores de vehículos con el fin de impulsar una movilidad con cero emisiones que concuerda con el principal atractivo de la zona: su biodiversidad. El proyecto consta de 80 puntos de carga distribuidos en comercios, hoteles y restaurantes de la zona y cuya recarga no se cobra al usuario, pues se utiliza como atractivo turístico para que las personas puedan viajar a esta región utilizando vehículos eléctricos. Este proyecto ya se ha replicado en al menos una zona turística más y se tienen planes a futuro para crear un corredor turístico eléctrico. (PNUMA, 2021).

2.4.1.2. Ecuador

Ecuador, a través de la Agencia de regulación y control de la electricidad (ARCONEL) implementó una tarifa especial para la recarga de vehículos eléctricos y permitió el ingreso de empresas de capital extranjero para el desarrollo de una infraestructura de carga (Vera *et. al.*, 2017).

Además, según indica PNUMA (2021) “a finales de 2020 el BID anunció que Ecuador aumentará el presupuesto disponible para financiar inversiones en transporte eléctrico sostenible. El proyecto espera financiar aproximadamente 80 buses y 370 taxis eléctricos en el país” (p. 46).

2.4.1.3. Chile

Chile por su parte ha implementado un plan de movilidad eléctrica que incluye objetivos como impulsar la penetración de los vehículos eléctricos en el transporte público y establecer regulaciones y estándares que faciliten la incorporación de esta tecnología a gran escala (Ministerio de Energía, 2017).

Además, a través de diferentes documentos técnicos y regulatorios ha establecido normas para la instalación y seguridad de infraestructura de carga y normas para la recarga inteligente que permita una comunicación con la red a la cual se conectan estas. Resaltan entre otros documentos el pliego técnico RIC No. 15 que, define los diferentes elementos de los centros de carga, así como los tipos de instalación y la declaración TE-6 para la comunicación de energización de infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos (PNUMA, 2021).

2.4.1.4. Uruguay

“Uruguay tiene tarifas específicas para la carga de vehículos eléctricos con el propósito de incentivar la adquisición y la utilización de vehículos eléctricos que son aplicables a puntos de carga públicos y privados” (PNUMA, 2021, p. 55).

Estas tarifas tienen valores diferentes según el horario en el que se realice la carga, al igual que en Guatemala, se tiene tres horarios de demanda de energía diferente y la tarifa diferenciada tiene como fin maximizar la recarga en el horario valle y minimizarla en el horario de punta. Esta tarifa se aplica a todos los puntos de recarga de la Administración Nacional de las Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE) y se realiza utilizando una tarjeta de recarga que en forma mensual detalla las cargas utilizadas y emite una factura comercial asociada a éstas.

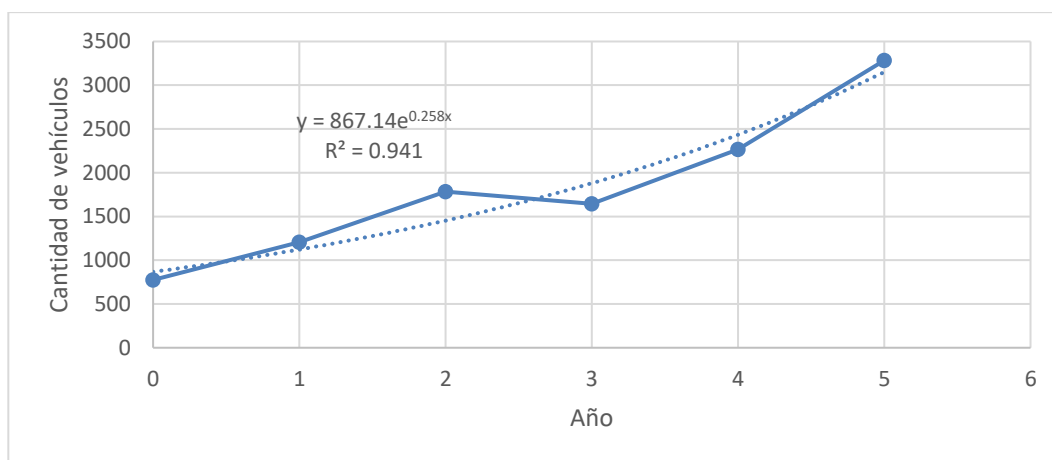
2.4.1.5. Resumen del crecimiento del parque vehicular en Latinoamérica

Se presenta el crecimiento histórico del parque de vehículos eléctricos de 7 países de Latinoamérica, así como el modelo de regresión que se aplicó a cada uno con el fin de obtener una ecuación que permita predecir el crecimiento de

cada parque y también establecer un modelo que pueda ser aplicado a Guatemala tomando como medios de correlación el PIB y la población del 2021. Tanto la ecuación como el valor de R^2 es presentado en la gráfica de cada país.

La figura 7 muestra el crecimiento histórico de México desde el año 2016 (año cero en la gráfica) hasta el 2021. La correlación con mayor valor de R^2 que se pudo obtener fue de tipo exponencial.

Figura 7. **Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de México**



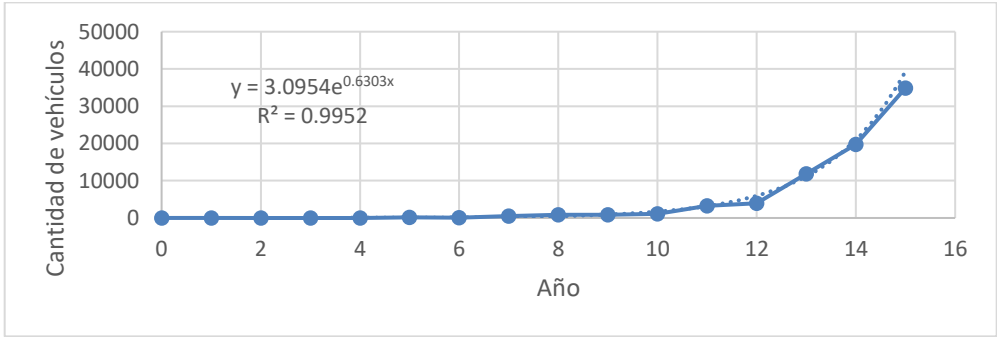
Fuente: elaboración propia, con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022).
Registro administrativo de la industria automotriz de vehículos ligeros.

La figura 8 muestra el crecimiento histórico de Brasil desde el año 2006 (año cero en la gráfica) hasta el 2021. La correlación con mayor valor de R^2 que se pudo obtener fue de tipo exponencial.

La figura 9 muestra el crecimiento histórico de Ecuador desde el año 2016 (año cero en la gráfica) hasta el 2021. La correlación con mayor valor de R^2 que se pudo obtener fue de tipo polinómica grado 3.

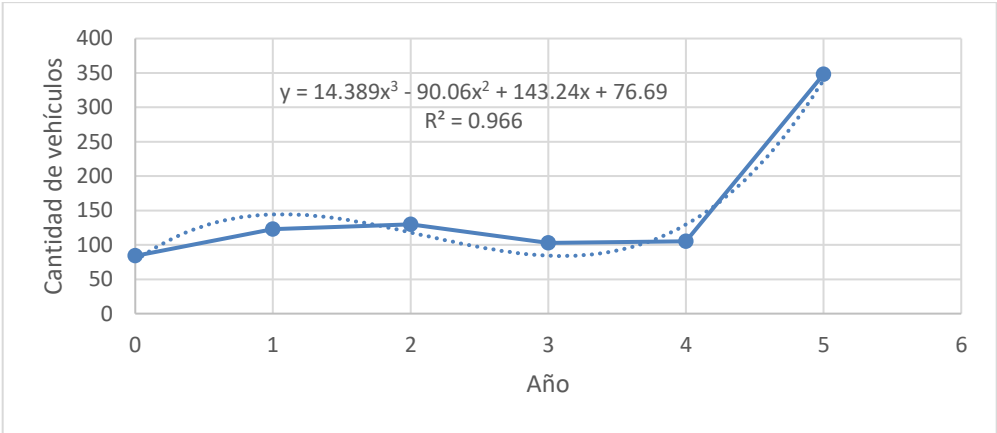
La figura 10 muestra el crecimiento histórico de Colombia desde el año 2011 (año cero en la gráfica) hasta el 2021. La correlación con mayor valor de R^2 que se pudo obtener fue de tipo exponencial.

Figura 8. **Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Brasil**



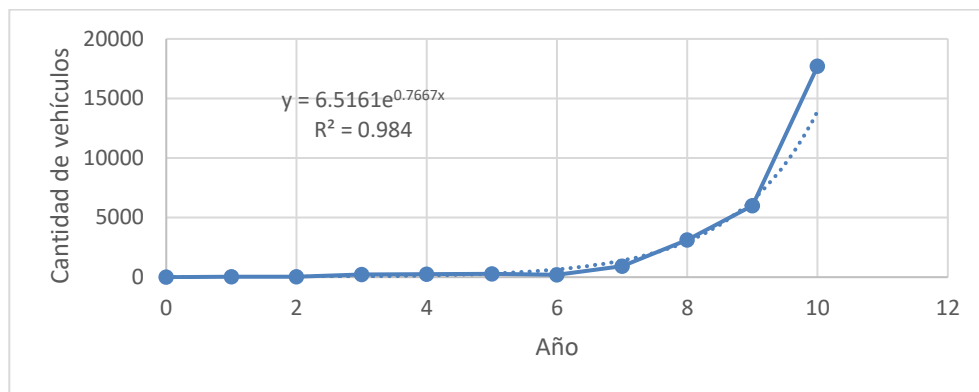
Fuente: elaboración propia, con datos de Asociación Nacional de Fabricantes de Vehículos Motorizados (2022). *Brazilian Automotive Industry Yearbook*.

Figura 9. **Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Ecuador**



Fuente: elaboración propia, con datos de Asociación de empresas automotrices de Ecuador (2022). *Sector automotriz en cifras*.

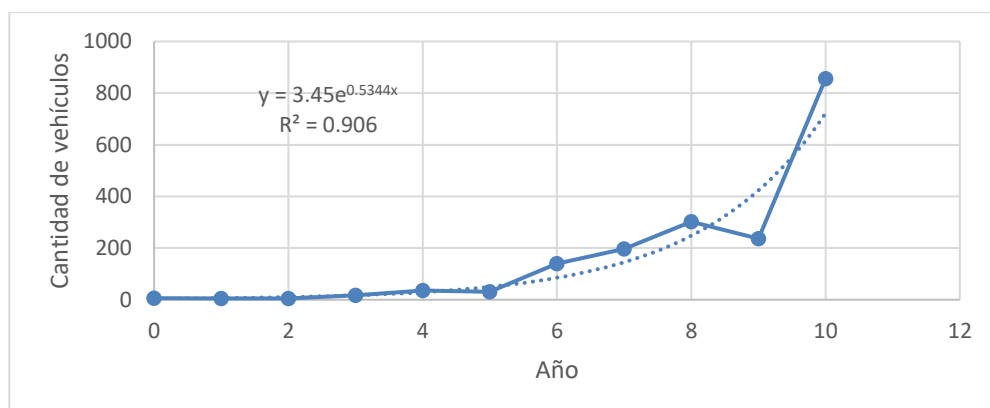
Figura 10. **Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Colombia**



Fuente: elaboración propia, con datos de Statista Research Department (2022c). *Número de vehículos eléctricos e híbridos vendidos en Colombia desde 2011 a 2021.*

La figura 11 muestra el crecimiento histórico de Chile desde el año 2011 (año cero en la gráfica) hasta el 2021. La correlación con mayor valor de R^2 que se pudo obtener fue de tipo exponencial.

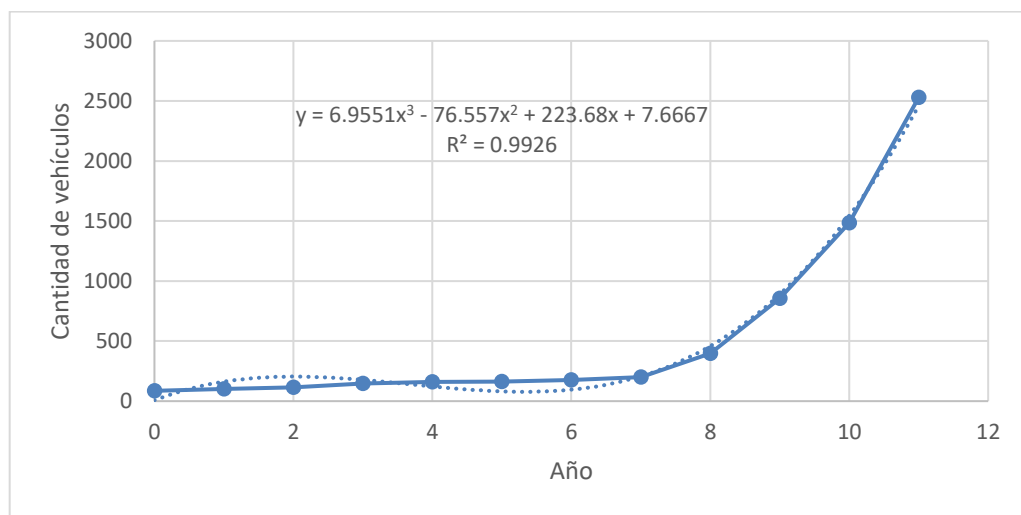
Figura 11. **Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Chile**



Fuente: elaboración propia, con datos de Asociación Nacional Automotriz de Chile (2022). *Informe vehículos cero y bajas emisiones julio 2022.*

La figura 12 muestra el crecimiento histórico de Costa Rica desde el año 2010 (año cero en la gráfica) hasta el 2021. La correlación con mayor valor de R^2 que se pudo obtener fue de tipo polinómica de grado 3.

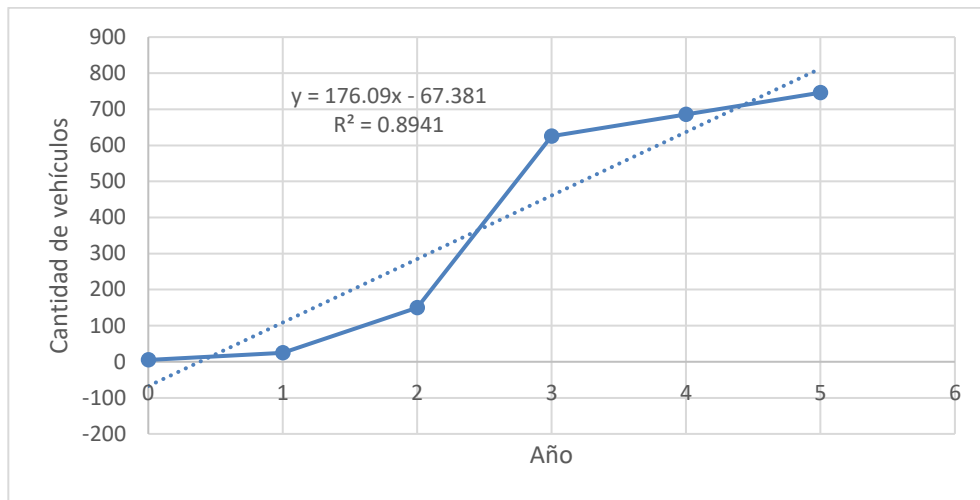
Figura 12. **Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de Costa Rica**



Fuente: elaboración propia, con datos del Statista Research Department (2022a). *Número de registros acumulados de vehículos eléctricos vendidos en Costa Rica de 2010 a 2022.*

La figura 13 muestra el crecimiento histórico de República Dominicana desde el año 2016 (año cero en la gráfica) hasta el 2021. La correlación con mayor valor de R^2 que devolviera resultados coherentes fue de tipo lineal. El modelo de este país tiene una interpolación para el año 2020 (año 4 en la gráfica), esto debido a que se tuvo un valor de ventas considerablemente bajo con respecto a los años anterior y posterior, se tomó esta decisión con el fin de evitar que este dato afectará el modelo.

Figura 13. **Modelo del crecimiento de vehículos eléctricos de República Dominicana**

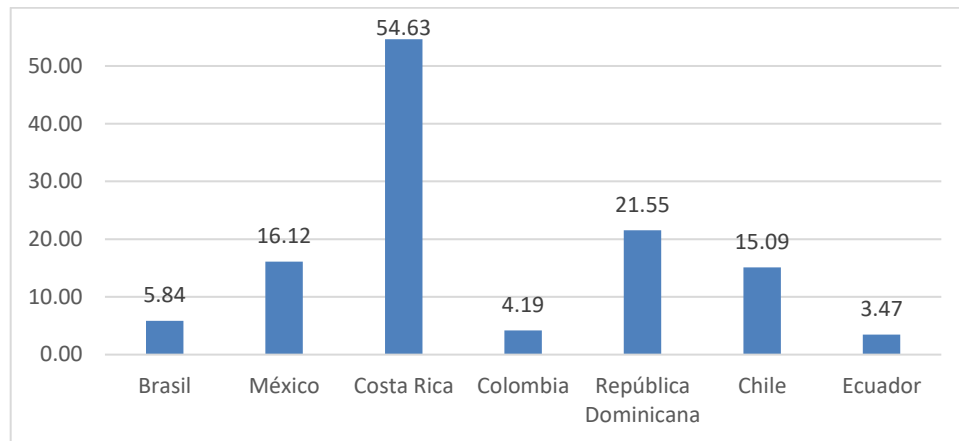


Fuente: elaboración propia, con datos del Statista Research Department (2022b). *Número de vehículos eléctricos de batería (BEV) registrados en la República Dominicana de 2016 a 2021.*

2.4.1.6. Indicadores relevantes en mercados de Latinoamérica

Se presentan indicadores relevantes respecto a estaciones de recarga pública de los mercados de Latinoamérica que fueron considerados para realizar el modelo de Guatemala.

Figura 14. **Puntos de recarga públicos por millón de habitantes en países de la región**

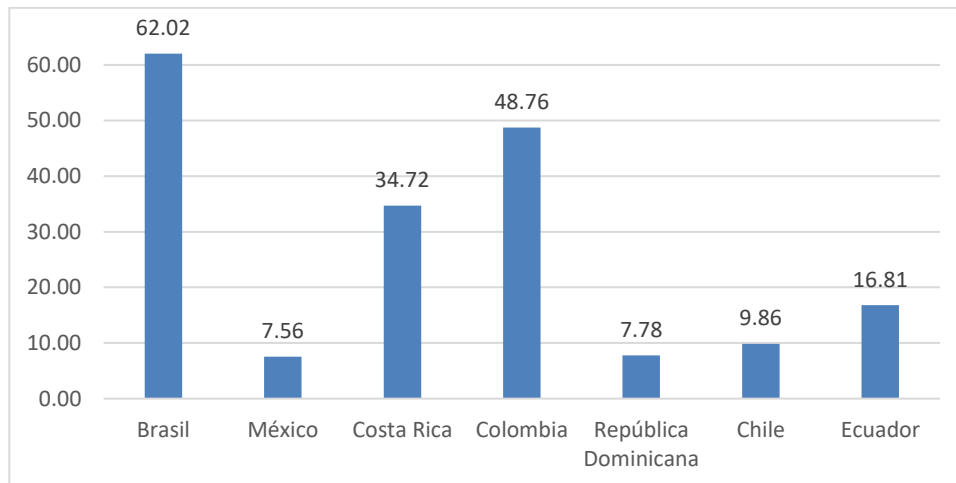


Fuente: elaboración propia, con datos de Datosmacro.com (2022). *Población al año 2021*, Electromaps (2022). *Electromaps*, y Recargo Inc. (2022) *Plugshare.com*.

2.4.2. **Movilidad eléctrica en Estados Unidos, Europa y Asia**

Los mercados analizados en esta sección, a diferencia de los mercados latinoamericanos, tienen avances más destacados en movilidad eléctrica y un amplio rango de características en función de factores como: tipo de residencia, patrones de manejo, *stock* de cargadores residenciales, entre otros. Tanto en la región, como en Guatemala es importante determinar los factores que inciden en el crecimiento del parque vehicular y las herramientas que deben utilizarse para este fin, por ello esta sección destaca lo hecho en ciudades con mercados ya establecidos.

Figura 15. **Cantidad de vehículos por estaciones de recarga pública en países de la región**



Fuente: elaboración propia, con datos de Asociación Nacional de Fabricantes de Vehículos Motorizados (2022). *Brazilian Automotive Industry Yearbook*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022). *Registro administrativo de la industria automotriz de vehículos ligeros*, Asociación de empresas automotrices de Ecuador (2022) *Sector automotriz en cifras*, Statista Research Department (2022c). *Número de vehículos eléctricos e híbridos vendidos en Colombia desde 2011 a 2021*, Asociación Nacional Automotriz de Chile (2022) *Informe vehículos cero emisiones y bajas emisiones*, Statista Research Department (2022a) *Número de registros acumulados de vehículos eléctricos vendidos en Costa Rica de 2010 a 2022*, Statista Research Department (2022b). *Número de vehículos eléctricos de batería (BEV) registrados en la República Dominicana de 2016 a 2021*, Electromaps (2022) *Electromaps y Recargo Inc.* (2022). *Plugshare.com*.

2.4.2.1. Estados Unidos

Según Slowik y Lutsey (2019), Estados Unidos ha tenido un crecimiento en las ventas de vehículos eléctricos vertiginoso, solamente en 2018 las ventas estuvieron por encima de los 350,000 vehículos, mientras que en el 2017 las ventas alcanzaron poco más de 200,000, esto significa un incremento en ventas

de alrededor del 175 %. Este crecimiento en ventas también se ve reflejado en la cantidad de puntos de carga que existen en el país, Slowik y Lutsey (2019) calculan los puntos de carga per cápita en 50 áreas metropolitanas y los separan por tipos de carga. San José tiene cerca de 140 puestos de carga rápida en DC públicos por millón de habitantes, cerca de 800 puntos de carga tipo 2 por millón de habitantes y alrededor de 1400 puntos de carga en lugares de trabajo por millón de habitantes. San José es la ciudad con más puntos de carga per cápita en Estados Unidos, le siguen San Francisco, San Diego, Los Ángeles y Sacramento.

Slowik y Lutsey (2019) indican que las políticas de gobierno implementadas por California y otros nueve estados que adoptaron la regulación vehicular Cero Emisiones han permitido un crecimiento acelerado debido a que esta requiere un incremento del parque vehicular hasta 2025. Hall y Lutsey (2020) identifican que “en California 83 % de los conductores cargan sus vehículos en casa, este porcentaje es mayor para aquellos que viven en casas individuales (90 %) y mucho menor para aquellos que viven en apartamentos (35 %)” (p. 6). Otro dato que comparten Hall y Lutsey (2020) es que Los Ángeles tiene 39 vehículos eléctricos por punto de carga, un número similar al que tienen ciudades como Madrid y Oslo. La cantidad de vehículos eléctricos por puntos de carga o los puntos de carga per cápita son indicadores que pueden ser planteados para dimensionar la infraestructura adecuada.

2.4.2.2. Europa

Al igual que Estados Unidos, varios países de Europa tienen un mercado ya establecido con regulaciones e incentivos que promueven la movilidad eléctrica y la creación de espacios para recarga vehicular. Según datos del European Alternative Fuels Observatory (citado por Fluchs, 2020) para el año

2017 Noruega tenía un *stock* de vehículos eléctricos puros de poco menos de 120,000, mientras que Francia superaba los 90,000 y Alemania tenía alrededor de 70,000.

En Noruega, durante el 2017 de cada 100 vehículos que se vendieron, aproximadamente 21 fueron vehículos eléctricos puros, En Dinamarca, 2.2 % de los vehículos que se registraron en 2015 fueron BEVs, y en Bélgica, casi el 2 % de nuevos registros fueron BEVs en 2017 (Fluchs, 2020).

Como se ha visto en otros mercados y se ha mencionado antes, los incentivos gubernamentales son una herramienta eficaz para el crecimiento de esta nueva tecnología, es por ello por lo que, hasta el año 2019 en veinticuatro países de la Unión Europea se han aplicado incentivos para los consumidores de vehículos eléctricos (Fluchs, 2020).

Sin embargo, no todos los países tienen un crecimiento igual, y aunque algunos tienen normativas establecidas, como el caso de España, su crecimiento de vehículos eléctricos es aún inferior al de otros países como Alemania, Francia, Reino Unido, Países Bajos y Noruega, que “son los países con mayores ventas de vehículos eléctricos y representan el 75 % de todas las ventas de BEV y PHEV en Europa” (Fluchs, 2020, p. 3).

Algunas estrategias destacadas desde el punto de vista política que destacan son las desarrolladas por el Ministerio de transporte y el Ministerio de Ambiente de Austria que en cooperación con la industria automovilística del país desarrollaron un conjunto de acciones que se reúnen en el E-Mobilistätspaket y cuyo fin es promover la movilidad eléctrica. Este paquete incluye entre otros el desarrollo de una infraestructura de recarga vehicular en el país (Iwan *et. al.*, 2019).

Es de notar que las políticas implementadas varían entre un país y otro e incluyen proyectos de incentivos que buscan documentar los resultados obtenidos por empresas y usuarios particulares que adquieran vehículos eléctricos. Ese es el caso de un proyecto desarrollado en Dinamarca especialmente para vehículos comerciales que reciben un subsidio de € 2700 del programa de financiamiento Danish Energy para comprar un vehículo Nissan e-NV200. A cambio las empresas involucradas comparten sus experiencias y se hace una comparación entre el vehículo eléctrico y su equivalente Nissan NV-200 que utiliza Diésel (Iwan *et. al.*, 2019).

Respecto al tipo de recarga que predomina en Europa, Hall y Lutsey (2020) indican que “dos tercios de la recarga de vehículos eléctricos en Alemania se realiza en casa, mientras que 61 % de los británicos que respondieron una encuesta sobre recarga vehicular indicaron que prefieren la recarga en casa” (p. 6).

No obstante, las estaciones de recarga vehicular públicas en Europa son más comunes que en Estados Unidos, Ámsterdam tiene casi 10,000 estaciones de carga mientras que Londres, París y Oslo tienen alrededor de 5,000 (Hall y Lutsey, 2020).

Oslo y Ámsterdam son las ciudades europeas con más puntos de recarga pública, Oslo tiene 3000 puntos por millón de habitantes y Ámsterdam 2750. Estos valores son bastante mayores a los que tienen las ciudades estadounidenses abordadas previamente y muestran otro tipo de mercado en el que la infraestructura pública juega un rol más importante (Hall y Lutsey, 2020).

2.4.2.3. China

Según Fluchs (2020), China es el mercado más grande de vehículos eléctricos del mundo, en 2017 su *stock* de vehículos eléctricos puros era de alrededor de 1,400,000 y para 2018 las ciudades de Shenzhen, Beijing y Shanghai tenían entre 40,000 y 60,00 puntos de recarga pública cada una.

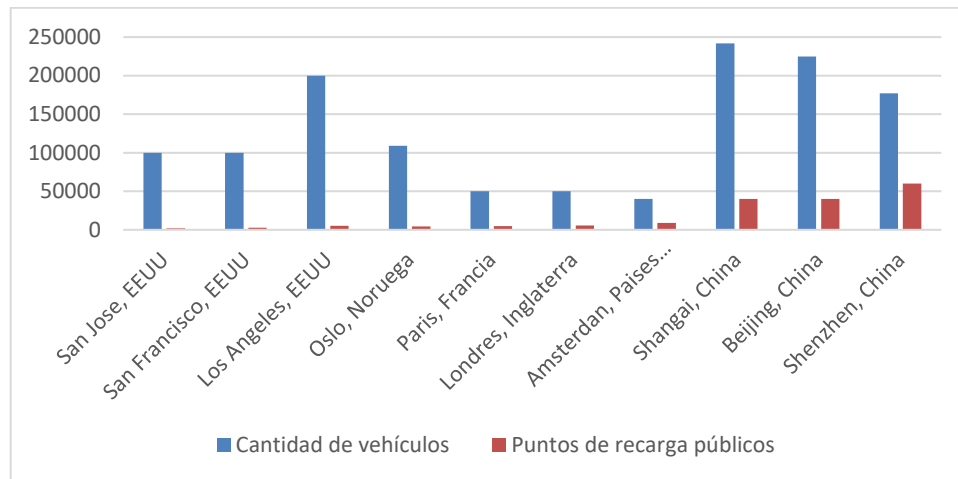
El crecimiento de este mercado se debe a proyectos de comercialización implementados por el gobierno chino, específicamente uno resalta del resto, que tuvo lugar entre enero de 2009 y diciembre de 2012 en 25 ciudades y que fue conocido como el proyecto de demostración (Wang, Pan y Zheng, 2017)

El éxito estuvo por sobre las expectativas del gobierno y propiciaron un segundo periodo entre 2013 y 2015. Para este plan “el gobierno chino promulgó una serie de incentivos para alcanzar sus objetivos propuestos cubriendo varios aspectos incluyendo producción, compra, uso e infraestructura de recarga” (Wang, Pan y Zheng, 2017, p. 178). Estas acciones permitieron que el mercado chino pasará a ser el mercado con mayores ventas de EVs a partir del 2015. El crecimiento de este mercado no solo es en la cantidad de vehículos registrados sino en la producción de estos, por ello cuatro empresas chinas hasta 2018 se encontraban en el top 10 de ventas de EVs a nivel global (BYD, BAIC, Roewe y Chery) (Dulcich *et. al.*, 2019).

2.4.2.4. Indicadores relevantes en mercados desarrollados

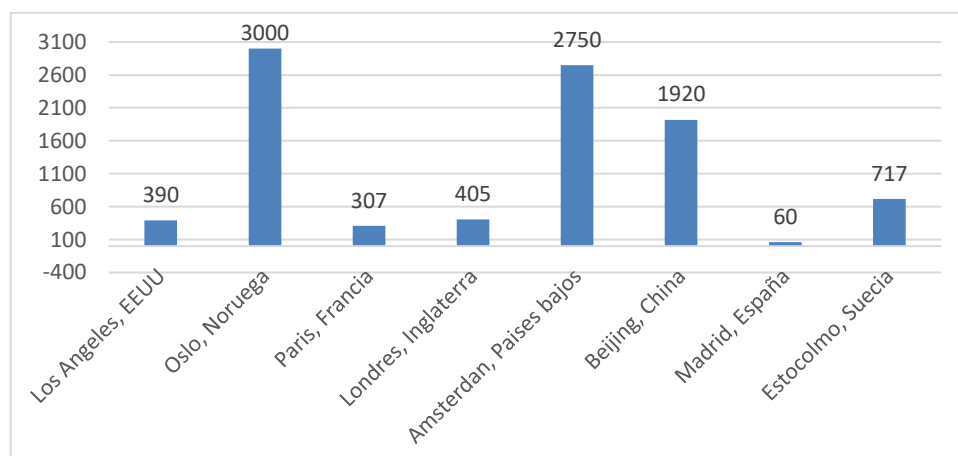
Se presentan indicadores de países y ciudades de Norteamérica, Asia y Europa relativos a la cantidad de estaciones de recarga pública.

Figura 16. **Cantidad de vehículos y puntos de recarga público en mercados desarrollados al año 2018**



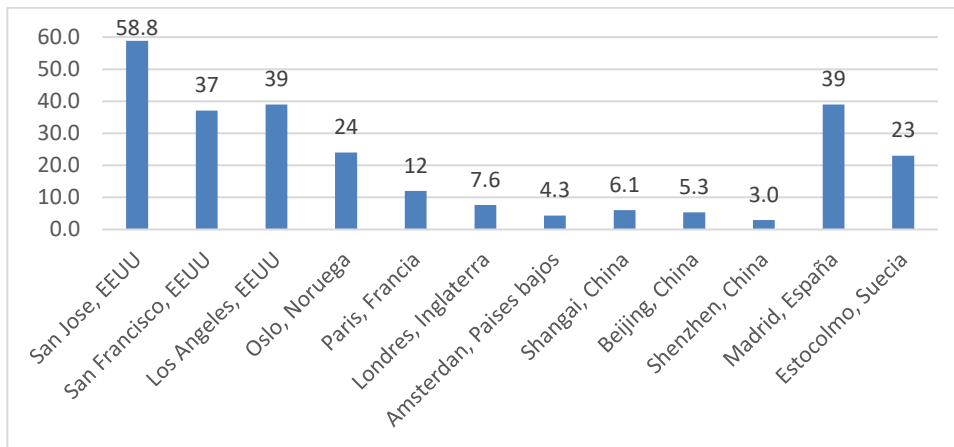
Fuente: elaboración propia, con datos de Hall y Lutsey (2020). *Electric vehicle charging guide for cities.*

Figura 17. **Puntos de recarga públicos por millón de habitantes en mercados desarrollados al año 2018**



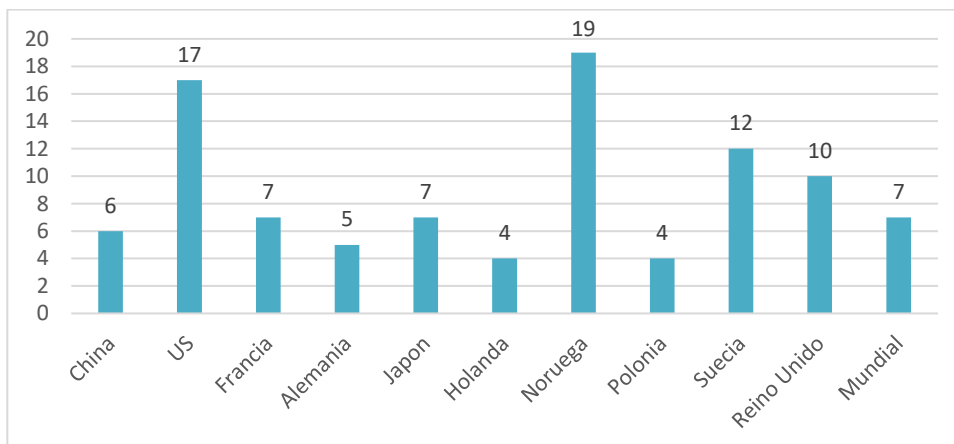
Fuente: elaboración propia, con datos de Hall y Lutsey (2020). *Electric vehicle charging guide for cities.*

Figura 18. **Cantidad de vehículos por estaciones de recarga pública en mercados desarrollados por ciudades al año 2018**



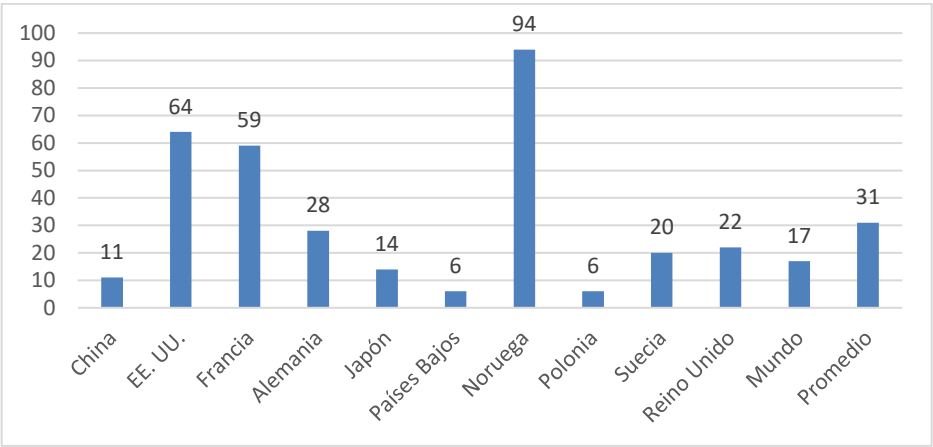
Fuente: elaboración propia, con datos de Hall y Lutsey (2020). *Electric vehicle charging guide for cities.*

Figura 19. **Cantidad de vehículos por estaciones de recarga pública en mercados desarrollados por países al año 2017**



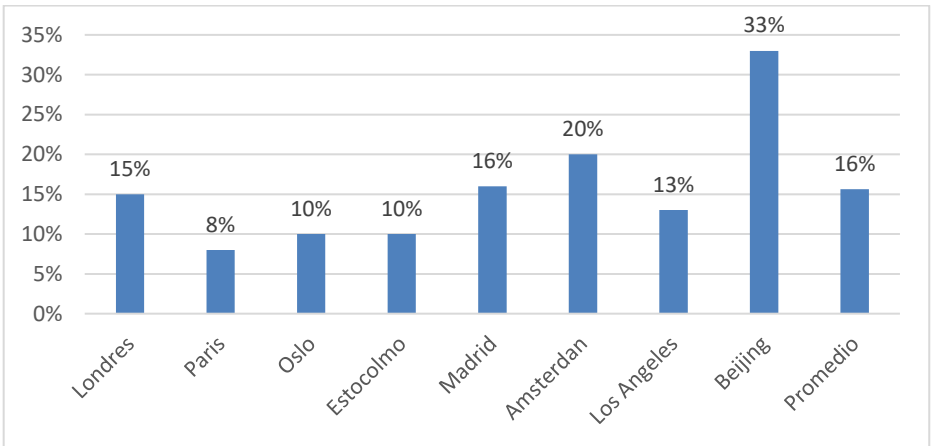
Fuente: Elaboración propia, con información de Funke, Sprei, Gnann y Plötz (2019). *How much charging infrastructure do electric vehicle need? A review of the evidence and international comparison.*

Figura 20. Cantidad de vehículos por estaciones de carga rápida en DC en mercados desarrollados por países al año 2017



Fuente: Elaboración propia, con información de Funke *et. al.* (2019). *How much charging infrastructure do electric vehicle need? A review of the evidence and international comparison.*

Figura 21. Porcentaje de estaciones de carga rápida en relación con total de estaciones de recarga pública en mercados desarrollados por ciudades al año 2018



Fuente: elaboración propia con datos de Hall y Lutsey (2020). *Electric vehicle charging guide for cities.*

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Características del estudio

Para establecer las características del estudio se explica primero el enfoque y el alcance de la investigación y luego se desarrolla el diseño de la investigación.

3.1.1. Enfoque del estudio

El enfoque del estudio es cuantitativo porque se analizaron datos numéricos mediante los cuales se estableció un modelo de crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala y se determinó una cantidad apropiada de centros de recarga vehicular eléctricos que se requiere para dicho modelo, además se analizó el crecimiento de la demanda de potencia y energía debido a dicho modelo, así como las implicaciones de este en el sistema nacional interconectado. Por último, mediante datos numéricos de cargabilidad y regulación de tensión se establecieron ubicaciones con alta probabilidad de falla ante el incremento de la demanda debido a estaciones de recarga pública.

3.1.2. Alcance del estudio

El alcance del estudio fue descriptivo-correlacional debido a que se estableció un modelo del crecimiento del parque de vehículos eléctricos mediante un análisis de correlación entre países de la región y Guatemala. También se estimó una cantidad adecuada de cargadores públicos en el país según el tipo de vivienda que predomina en la población guatemalteca. Una vez establecidas

estas relaciones se determinó la demanda de potencia y energía que supone este nuevo elemento añadido a la red y las formas en las que impactó la matriz energética del país y otros parámetros del mercado mayorista de energía. Por último, se describieron las ubicaciones del SNI que presentaron problemas de cargabilidad o regulación de tensión debido al crecimiento normal de la demanda y debido a la posibilidad de instalar centros de recarga vehicular pública.

3.1.3. Diseño del estudio

El diseño abordado fue de tipo no experimental dado que no se tuvo control sobre las variables de investigación, únicamente se realizaron estimaciones tomando en cuenta distintos factores de correlación. Por lo tanto, únicamente se analizaron los fenómenos descritos en el marco teórico y en el marco metodológico para determinar relaciones causales entre algunas variables y descripciones donde correspondía.

3.2. Unidades de análisis

La unidad de análisis que se abordó en el estudio es la infraestructura de recarga vehicular que tiene propiedades como ubicación, demanda de energía y demanda de potencia. Esta unidad se relaciona con el número de vehículos de una región, tipo de vivienda y población.

3.3. Variables

Las variables de estudio se presentan en la tabla II y se clasifican en categóricas y numéricas. También se incluye el nivel de medición y si la variable es manipulable u observable desde el punto de vista de la investigación. Esta

clasificación permitió seleccionar las herramientas estadísticas para análisis y presentación de los datos obtenidos.

Tabla II. Tipo de variables

Variable \ Criterio	Categórica		Numérica		Manipulable	Observable	Escala de medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua			
Ubicación		X			X		Nominal
Demanda de Energía				X		X	Razón
Cantidad de estaciones de carga			X		X		Razón
PIB				X		X	Razón
Tipo de vivienda	X					X	Nominal
Población			X			X	Razón
Número de vehículos			X			X	Razón
Demanda de potencia			X			X	Razón
Subestación eléctrica	X				X		Nominal

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Las variables de estudio se describen en la tabla III.

Tabla III. **Descripción de las variables**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Ubicación	Espacio físico en el que se instalará un centro de carga eléctrica vehicular.	Se midió en función de los parámetros de regulación de tensión y cargabilidad de una línea o subestación eléctrica. Se dividió en categorías: subestaciones con problemas o sin problemas para la instalación de estaciones de recarga.
Demanda de Energía	Cantidad de potencia requerida en un tiempo definido.	Se midió en función de la potencia que demandan los diferentes tipos de vehículos que se conectan a estaciones de recarga vehicular eléctrica pública y en función del tiempo requerido para la recarga. La unidad de medida es kWh.
Cantidad de estaciones de carga	Número de estaciones disponibles para recarga de vehículos en el país.	Se midió de acuerdo con la cantidad de vehículos eléctricos en circulación, el tipo de vivienda de la zona y la cantidad de horas promedio de traslado. La unidad de medida es cardinal
PIB	Indicador económico que refleja el valor monetario de todos los bienes y servicios finales producidos por un territorio en un determinado periodo de tiempo.	Se midió de acuerdo con el histórico y las proyecciones realizadas por el banco de Guatemala y el histórico de los distintos países abordados en el análisis. La unidad de medida es de miles de millones de dólares estadounidenses.
Tipo de vivienda	Tipo de construcción en la que habita la población del país.	Se midió de acuerdo con los datos recabados por el instituto nacional de estadística, Se divide en categorías como casa formal o apartamento.

Continuación tabla III.

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Población	Cantidad de personas que habitan un país.	Se midió de acuerdo con los datos recabados por el instituto nacional de estadística. La unidad de medida es cardinal.
Número de vehículos	Cantidad de vehículos eléctricos que están registrados en Guatemala y que requieren un cargador.	Se midió según datos recabados de la SAT y otras fuentes de información y por las proyecciones realizadas en este estudio. La unidad de medida es cardinal.
Demanda de potencia	Valor de potencia eléctrica demandada por un elemento dentro del sistema eléctrico de potencia.	Se midió de acuerdo con la cantidad de vehículos eléctricos que se prevé que se conectarán a la red mediante una estación de recarga vehicular pública. La unidad de medida es el Watt.
Subestación eléctrica	Centro de transformación o de maniobras eléctricas que sirve como medio para conectar generación y demanda.	Se midió según datos del ministerio de energía y minas. Se dividió en categorías como con problemas o sin problemas para recibir demanda de una estación de recarga pública.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.4. Fases de estudio

El presente estudio fue separado en cinco fases que permitió abordar de manera adecuada los objetivos de la investigación.

3.4.1. Fase 1: exploración bibliográfica

En esta primera fase se hizo una revisión bibliográfica de estudios relacionados con la movilidad eléctrica y con las estaciones de recarga pública. Se analizaron tres tipos de fuentes: primero, se abordó literatura que permitió tener claros los conceptos teóricos relacionados con el estudio; segundo, se analizaron tendencias de la movilidad eléctrica y el crecimiento del parque vehicular, tanto en Guatemala como en otros países, de tal manera que se determinaron factores y modelos que correlacionaron las variables de estudio; por último, se realizó una exploración de investigaciones que apoyaron directamente el desarrollo del estudio.

3.4.2. Fase 2: creación de un modelo de crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala para el periodo 2022-2037

Un primer modelo del parque de vehículos eléctricos en Guatemala fue realizado con base en el crecimiento histórico que ha tenido esta tecnología en el país, con datos que incluyen vehículos híbridos enchufables y vehículos eléctricos desde el 2003 hasta el 2022. El modelo fue realizado utilizando una correlación polinómica de grado 3, el cual dio el resultado más satisfactorio tomando como parámetro el estadístico R^2 . El resultado del modelo se muestra en la figura 22.

El modelo mostrado en la figura 22 tiene un valor de R^2 de 0.8149 y tiene como valor máximo para el año 2022 455 vehículos registrados hasta el mes de mayo. Debido a que es una cantidad baja de vehículos, comparado con otros países de la región, se decidió adaptar un modelo para Guatemala tomando como referencia países de la región que hayan experimentado un crecimiento mayor a

la fecha o que presenten un modelo más certero. Para poder determinar qué modelo es el más adecuado para Guatemala se tomó como parámetros el PIB y la población del país, los países que fueron tomados en cuenta para el modelo se listan en la tabla V.

El primer país en ser considerado para el modelo fue Ecuador, el criterio utilizado es la similitud en la población. Aunque Ecuador tiene un crecimiento similar al de Guatemala, el modelo tiene un valor de R^2 superior al modelo de Guatemala, este valor se puede observar en la figura 7 del marco teórico.

El siguiente país en ser considerado fue Costa Rica, utilizando como criterio el PIB, si bien no es un valor tan cercano, es un valor que tiene mayor similitud que otros países de la lista. El modelo de Costa Rica puede observarse en la figura 10 del marco teórico.

El último país en ser considerado fue República Dominicana, el criterio utilizado fue el PIB. El modelo puede observarse en la figura 11 del marco teórico.

En las figuras 23, 24 y 25 se presenta el crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala utilizando los 3 modelos antes mencionados.

3.4.3. Fase 3: determinación una cantidad apropiada de estaciones de recarga pública para vehículos eléctricos en Guatemala

Para determinar la cantidad apropiada de estaciones de recarga pública que debería tener Guatemala se tomó como parámetro el factor indicado por Tsakalidis *et. al.* (2019) que indican un valor adecuado de entre 7 y 27 vehículos eléctricos por estación de recarga pública.

El valor adecuado depende de las características de movilidad según Funke *et. al.* (2019) y del tipo de vivienda que predomina en el país para Hall y Lutsey (2020) y Tsakalidis *et. al.* (2019). Las figuras 16 y 17 muestran los valores que se tiene en países y ciudades de mercados desarrollados respecto al factor de vehículos eléctricos por estación de recarga pública, la figura 13 muestra los valores en países de la región. El promedio de los valores mostrados en estas figuras, así como los valores de Ecuador, Costa Rica y República Dominicana son mostrados en la tabla VI y se consideran los valores más relevantes a tomar en cuenta para Guatemala.

Hall y Lutsey (2020) indican que para países o ciudades en los que predomina el tipo de vivienda “casa formal” por sobre otros tipos, entre el 70 % y el 90 % de la recarga vehicular se realiza en casa o en lugares de trabajo, lo que implica menos demanda de cargadores públicos, la información sobre el tipo de vivienda en Guatemala se presenta en la figura 26.

Considerando que el tipo de vivienda predominante en Guatemala es casa formal, es de esperarse que de cada 100 vehículos en circulación únicamente entre 10 y 30 vehículos requieran recarga pública. Estos números son un primer acercamiento al factor que se desea encontrar. Analizando la tabla VI se encuentra que el promedio de los países de la región es 27, en el límite superior del factor que se propuso con anterioridad, Costa Rica tiene un valor mayor y Ecuador y República Dominicana presentan valores más bajos. Sin embargo, considerando el tipo de vivienda predominante en Guatemala y las tendencias de los países de la región y de los países modelo utilizados para Guatemala se consideró que el valor límite superior del factor es un valor adecuado para el desarrollo de este estudio, es decir, 27 vehículos eléctricos por cada estación de recarga pública.

La proyección del número de estaciones de recarga pública para el período de estudio con base en los modelos de las figuras 23, 24 y 25 se muestra en la figura 27.

Del total de estaciones de recarga pública, se tomó como un valor indicativo para la cantidad de estaciones de recarga rápida el porcentaje promedio indicado en la figura 21 del marco teórico. Este dato fue utilizado para determinar la cantidad de estaciones de carga rápida que se debería tener en el país para satisfacer la demanda de recarga de los vehículos eléctricos propuestos en los tres modelos, el resultado se muestra en la figura 28.

3.4.4. Fase 4: determinación de la demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos en el periodo 2022-2037

Según las fuentes consultadas y con base en lo establecido en el marco teórico, en la sección 2.2.1.3 se indica que el consumo de potencia de un cargador semi rápido de recarga pública está en un rango de entre 7 y 43 kW y en la sección 2.2.1.4 se tiene que el consumo de potencia de un cargador de recarga rápida está entre 50 y 200 kW. Para el presente estudio se tomó como valor promedio 5 cargadores por cada estación de carga pública sea carga rápida en DC o carga semi rápida en AC. Las probabilidades de demanda de potencia son demasiadas de tal manera que quedan fuera del alcance de este estudio, es por ello por lo que se consideró solo los escenarios en los que los 5 cargadores tienen demanda mínima, máxima y promedio. Los resultados se muestran en las tablas VII y VIII.

Para establecer la demanda total de potencia debido a las estaciones de recarga pública que pueden presentarse en un día se consideran asimismo los

tres escenarios posibles de demanda mínima, máxima y promedio, los resultados para los tres modelos de crecimiento se presentan en las figuras 29, 30 y 31.

Para determinar el consumo total de energía se tomó en cuenta que únicamente 27 de cada 100 vehículos eléctricos en circulación harán uso de las estaciones de recarga pública, sin importar si utilizan carga rápida o semi rápida.

La capacidad de las baterías de los vehículos que se comercian actualmente está en un rango de entre 30 y 80 kWh según Singh (2021) y Anaya, (2018). Se excluye para el presente estudio recarga de buses eléctricos por considerar que éstos utilizarían estaciones de recarga privada y no pública.

Al igual que el caso de la demanda de potencia, se presentan 3 posibles escenarios de demanda de energía tomando en consideración la capacidad mínima, máxima y promedio de las baterías de vehículos eléctricos en el mercado. Los resultados se muestran en las figuras 32, 33 y 34.

3.4.5. Fase 5: determinación del impacto de la recarga vehicular pública en el sistema nacional interconectado

Una vez se estableció el modelo del crecimiento del parque vehicular eléctrico y se determinó la cantidad de vehículos promedio que utilizarán recarga vehicular pública fue posible calcular la cantidad de potencia y energía que estos demandarán durante los 15 años del estudio. Para obtener un valor total del crecimiento de la demanda de energía y potencia se realizó una proyección del crecimiento de la demanda de energía y potencia utilizando para ello tres modelos: uno utilizando el crecimiento histórico de la demanda y otros dos utilizando proyecciones hechas por el Ministerio de Energía y Minas basados en un crecimiento bajo y medio (MEM, 2022).

Con estos datos se establecieron los requerimientos máximos de energía anual y potencia máxima en un día para cada año de estudio.

Se presenta en las figuras 35 y 36 la proyección del crecimiento de la demanda de energía anual y de la demanda máxima de potencia en el SNI utilizando modelos presentados en las figuras 5 y 6 del marco teórico, así como tasas de crecimiento establecidas por el Ministerio de Energía y Minas.

Las tasas de crecimiento establecidas fueron basadas en variables económicas mediante un desglose mensual, el objetivo era obtener resultados más cercanos a la realidad (MEM, 2022).

El resultado de las tres proyecciones presentadas no toma en cuenta la demanda de energía y potencia que se tendrá debido a una red de recarga vehicular pública, los resultados de añadir esta demanda se muestran en las secciones 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 de la sección de resultados

3.4.6. Fase 6: ubicación de nodos y líneas con problemas de cargabilidad o regulación de tensión

El estudio tuvo como objetivo describir los nodos y líneas del SNI que podrían tener inconveniente al añadir estaciones de carga vehicular pública debido a que la potencia que pueden demandar es considerable según la cantidad de vehículos que se conecten a ellas y el modo de carga del que dispongan, por ello en esta fase se recabó información respecto a subestaciones y líneas de transmisión operando cerca del límite de su capacidad y con problemas de regulación de tensión, esto con el fin de indicar aquellas zonas del país en las que habría que hacer ampliaciones que permitan la conexión segura de carga vehicular eléctrica. Los datos fueron obtenidos del MEM.

Se establecen dos factores para determinar si un nodo o línea de transmisión tiene problemas para soportar el aumento de demanda de potencia y energía debido a una red de recarga pública de vehículos eléctricos, estos son: la cargabilidad de las líneas y transformadores del sistema de transmisión y la regulación de tensión en subestaciones eléctricas que estén fuera del 5 % que establece la norma (CNEE, 1999).

Para determinar los elementos del sistema de transmisión que cuentan con estos inconvenientes se tomó en consideración lo establecido por el MEM en el Plan de expansión del sistema de transporte 2020-2034 por ser la información con la que se cuenta que coincide parcialmente con el período de estudio. Los elementos se resumen en la tabla IX. Para determinar en cuáles de estos elementos se tendrá mayor demanda de potencia y energía se consideró que el crecimiento del parque de vehículos eléctricos en el país estará disperso en los 22 departamentos de acuerdo con los porcentajes de que se tienen a fecha julio 2022, los cuales son presentados en la figura 55. Los porcentajes del parque de vehículos en los departamentos con problemas en nodos o líneas son presentados en la figura 56.

3.5. Técnicas de análisis de la información

Para el desarrollo de un modelo que determinara el crecimiento del parque de vehículos eléctricos se utilizó regresión exponencial y regresión polinómica de grado 3, de datos históricos de países de la región. Se utilizó como criterio el estadístico R cuadrado para determinar el tipo de regresión más adecuado para los datos con los que se contaba.

Todos los datos relacionales fueron presentados a través de herramientas de estadística descriptiva como diagramas de columnas y medidas de tendencia central, un resumen de estas se presenta en la tabla IV.

Tabla IV. **Datos sujetos a análisis**

Dato	Relacionado con:	Tipo de análisis
Crecimiento del parque vehicular.	• Instalación de puntos de recarga pública. • Población. • PIB. • Tipo de vivienda.	• Coeficiente de determinación. • Medidas de tendencia central. • Medidas de variabilidad
Demanda de energía y potencia eléctrica	• Crecimiento del parque vehicular • Cantidad de puntos de recarga públicos.	• Coeficiente de determinación. • Medidas de tendencia central. • Medidas de variabilidad
Instalación de puntos de recarga pública	• Tipo de vivienda más común. • Parámetros de la red.	• Medidas de tendencia central • Medidas de variabilidad

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.5.1. Definición de técnicas de análisis

Se definen las herramientas estadísticas que se utilizaron en el análisis de los datos recabados.

3.5.1.1. Medidas de tendencia central

“Las medidas de tendencia central son puntos en una distribución obtenida, son los valores medios o centrales de ésta y ayudan a ubicarla dentro de la escala de medición de la variable analizada” (Sampieri *et. al.*, 2014, p. 286). Se utilizaron las medidas de tendencia central que se definen a continuación, según Sampieri k (2014).

- La moda es la categoría o puntuación que ocurre con mayor frecuencia
- La mediana es el valor que divide la distribución por la mitad
- La media se define como el promedio aritmético de una distribución.

3.5.1.2. Medidas de variabilidad

Según Sampieri *et. al.* (2014) indican la dispersión de los datos en la escala de medición de la variable considerada y responden a la pregunta ¿dónde están diseminadas las puntuaciones o los valores obtenidos, las medidas de variabilidad que se utilizaron son las siguientes:

- Rango, que es la diferencia entre la puntuación mayor y la puntuación menor.
- Desviación estándar, que es el promedio de desviación de las puntuaciones con respecto a la media, se puede interpretar como cuánto se desvía, en promedio, de la media un conjunto de puntuaciones.

3.5.1.3. Coeficiente de correlación de Pearson

Es una prueba estadística para analizar la relación entre dos variables de medición o intervalos de razón (Sampieri *et. al.*, 2014).

3.5.1.4. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación es equivalente a elevar al cuadrado el coeficiente de Pearson y el valor indica la varianza de factores comunes. Esto es el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra variable y viceversa (o cuanto explica o determina una variable la variación de la otra) (Sampieri *et. al.*, 2014).

Respecto al valor que establece un nivel de correlación adecuado “un coeficiente de determinación entre 0.66 y 0.85 ofrece una buena predicción de una variable respecto de la otra variable; y por encima de 0.85 implica que ambas variables miden casi el mismo concepto” (Sampieri *et. al.*, 2014, p. 306)

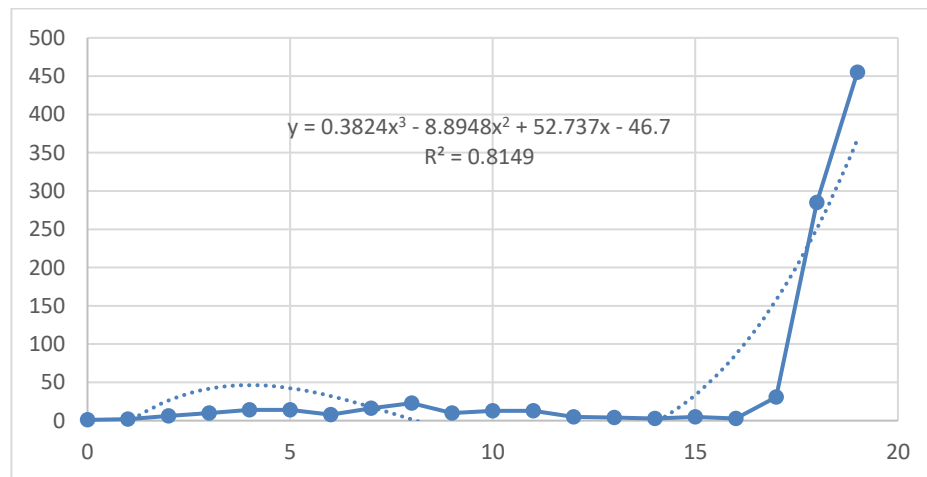
4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del presente estudio.

4.1. Modelo de crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala para el período 2022-2037

El proceso que se siguió para obtener los resultados que se presentan a continuación está definido en la sección 3.4.2 del desarrollo de la investigación.

Figura 22. **Modelo del crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala con base histórica de vehículos eléctricos**



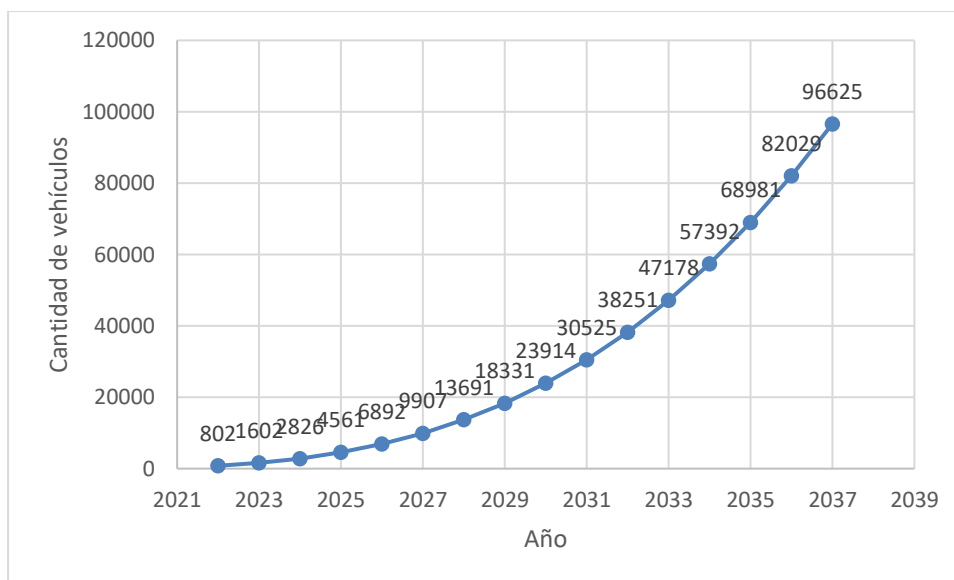
Fuente: elaboración propia, con datos de SAT (2022). Resolución No. R-SAT-IAJ-DC-UIP-178-2022.

Tabla V. **Países considerados para crear modelo de crecimiento de vehículos eléctricos en Guatemala**

	PIB [miles de millones de US\$]	Población
Guatemala	85.72	17,109,746
México	1294.83	130,262,220
Brasil	1608.08	213,993,441
Ecuador	106.17	17,888,474
Colombia	314.27	51,049,000
Chile	316.86	19,212,362
Costa Rica	64.28	5,180,000
República Dominicana	94.71	10,953,714

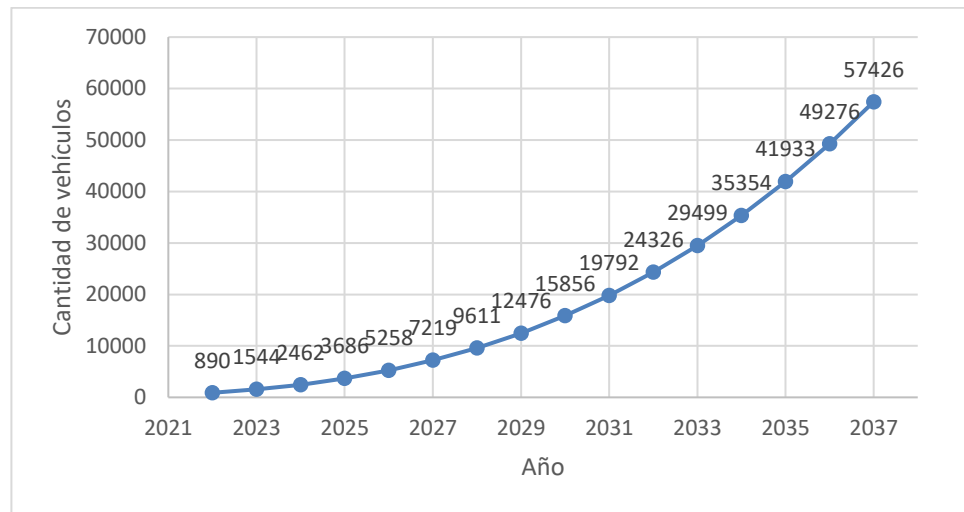
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 23. **Proyección del crecimiento del parque vehículos eléctricos en Guatemala utilizando modelo de Ecuador**



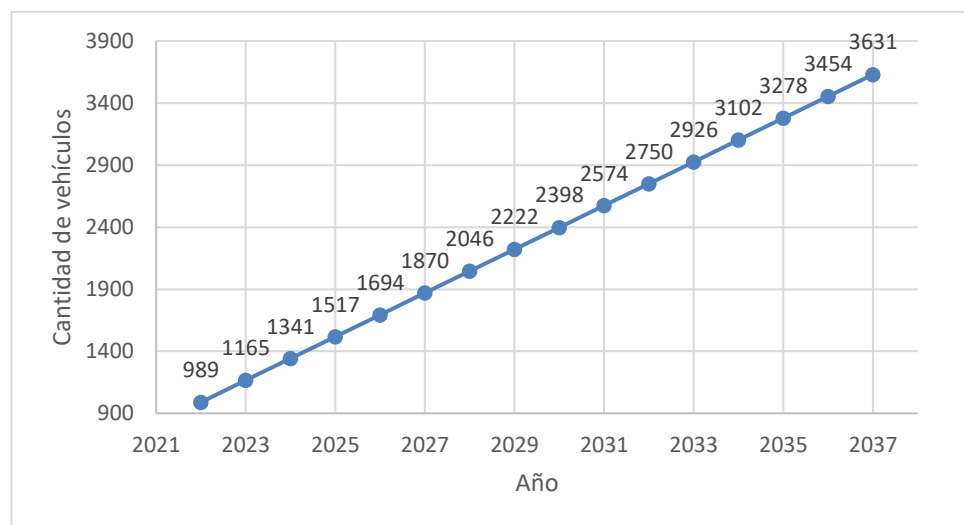
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 24. **Proyección del crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala utilizando modelo de Costa Rica**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 25. **Proyección del crecimiento del parque de vehículos eléctricos en Guatemala utilizando modelo de República Dominicana**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2. Determinación de una cantidad apropiada de estaciones de recarga pública en Guatemala

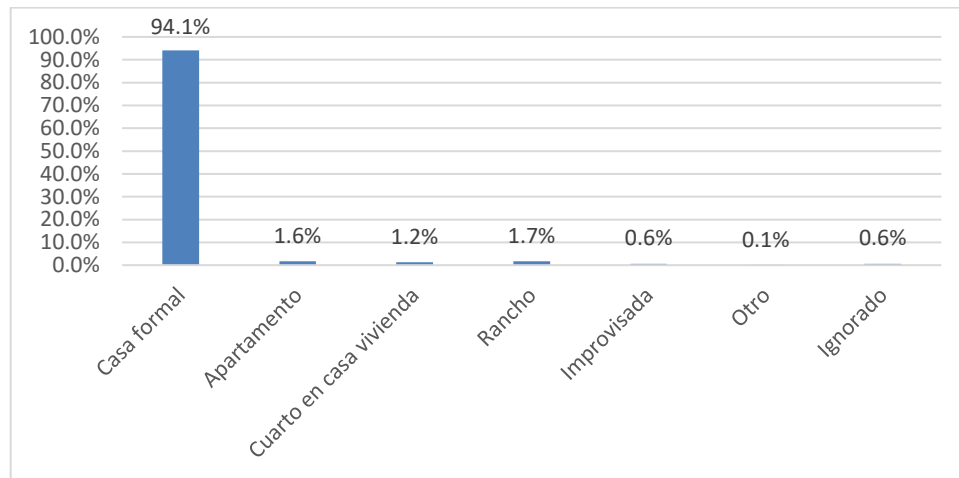
El proceso que se siguió para obtener los resultados que se presentan a continuación está definido en la sección 3.4.3 del desarrollo de la investigación.

Tabla VI. **Valores relevantes del factor vehículos eléctricos por estación de recarga pública**

País/Ciudad/Promedio	Cantidad de vehículos por estaciones de recarga pública	Comentario con base en factor propuesto por Tsakalidis, et al., (2019)
Promedio de países con mercados desarrollados	9	Factor bajo
Promedio de ciudades en mercados desarrollados	22	Factor adecuado
Promedio de países de la región	27	Factor alto
Costa Rica a agosto 2022	35	Factor alto
Ecuador a agosto 2022	17	Factor adecuado
República Dominicana a agosto 2022	8	Factor bajo

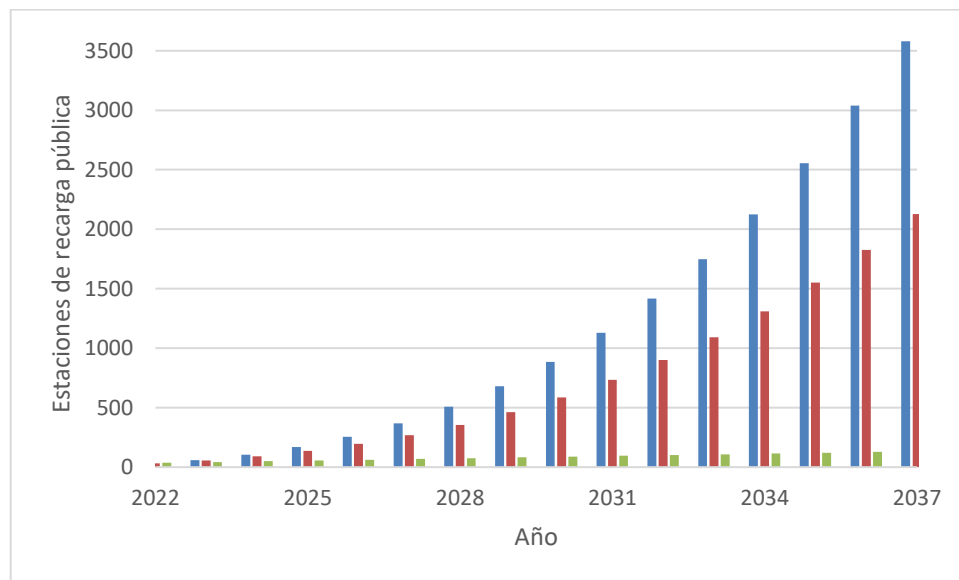
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 26. Tipo de vivienda en Guatemala



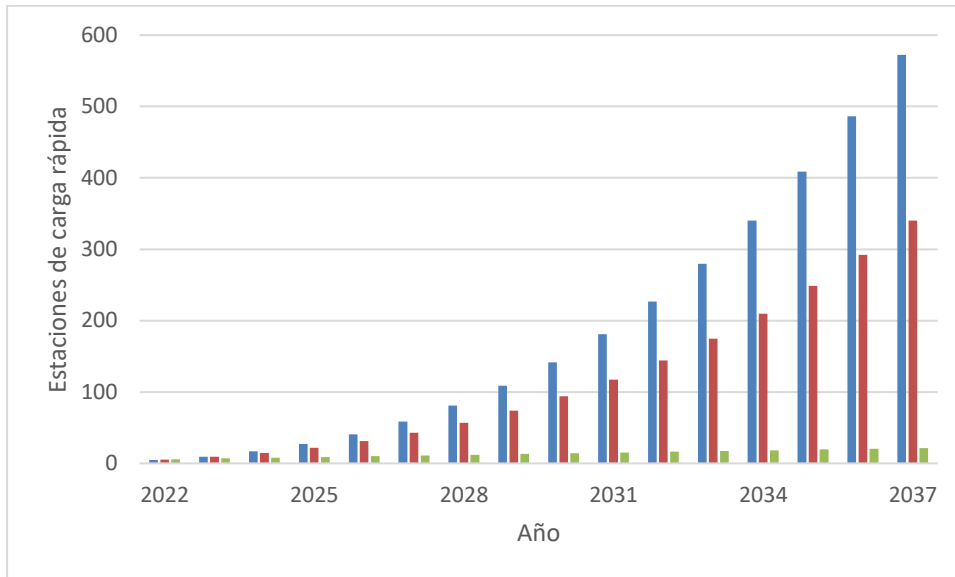
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 27. Estaciones de recarga pública para el periodo de estudio para los tres modelos definidos con anterioridad



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 28. **Estaciones de carga rápida para el periodo de estudio para los tres modelos definidos con anterioridad**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.3. **Determinación de la demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos para el período 2022-2037**

El proceso que se siguió para obtener los resultados que se presentan a continuación está definido en la sección 3.4.4 del desarrollo de la investigación.

Tabla VII. **Escenarios de demanda de potencia en estaciones de recarga pública con cinco cargadores semi rápidos AC**

Potencia por cargador [kW]	Total [kW]
7	35
25	125
43	215

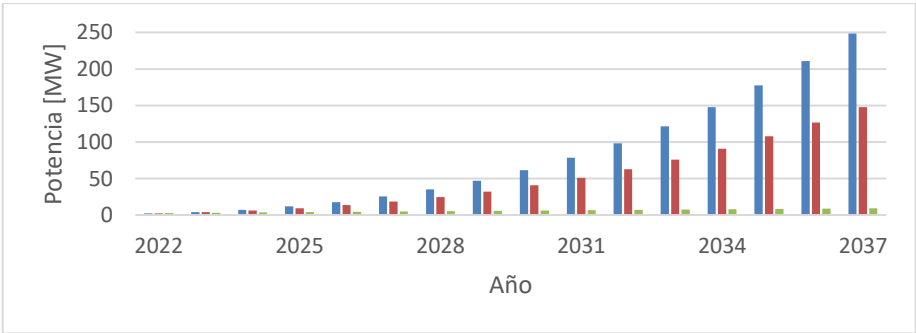
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla VIII. **Escenarios de demanda de potencia en estaciones de recarga pública con cinco cargadores rápidos en DC**

Potencia por cargador [kW]	Total [kW]
50	250
125	625
200	1000

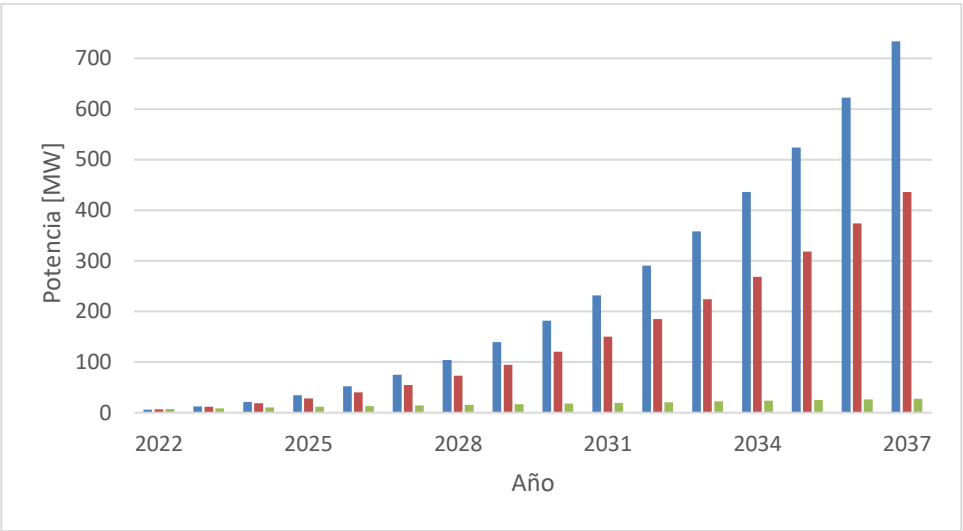
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 29. **Escenario de demanda de potencia mínima debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas**



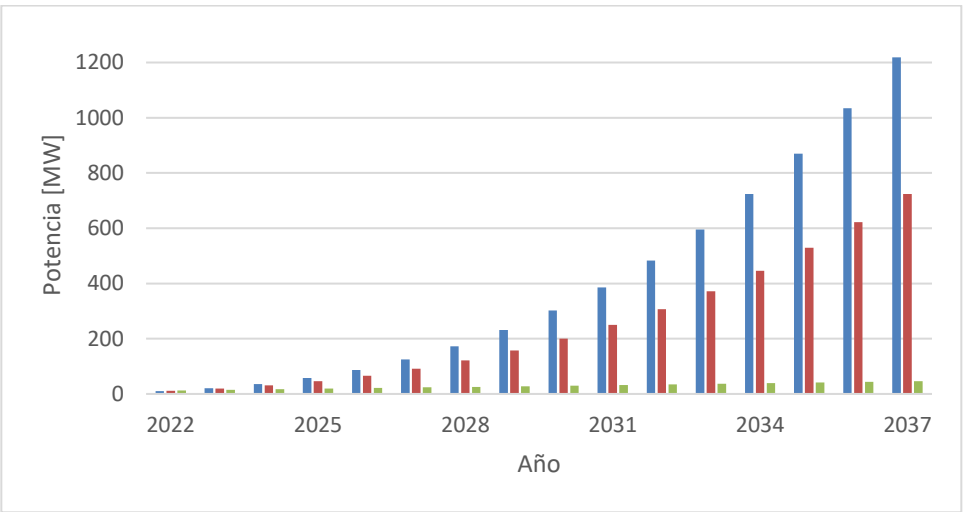
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 30. **Escenario de demanda de potencia media debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas**



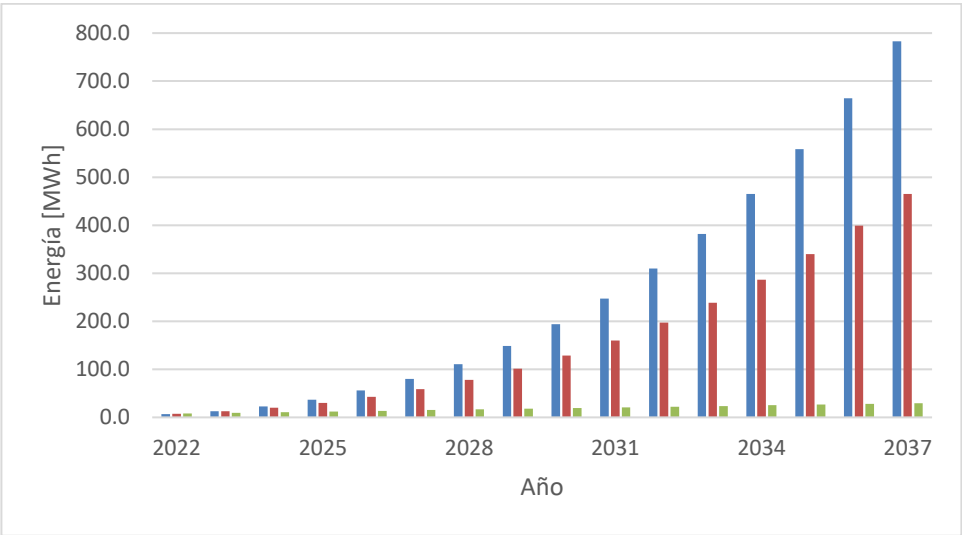
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 31. **Escenario de demanda de potencia máxima debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas**



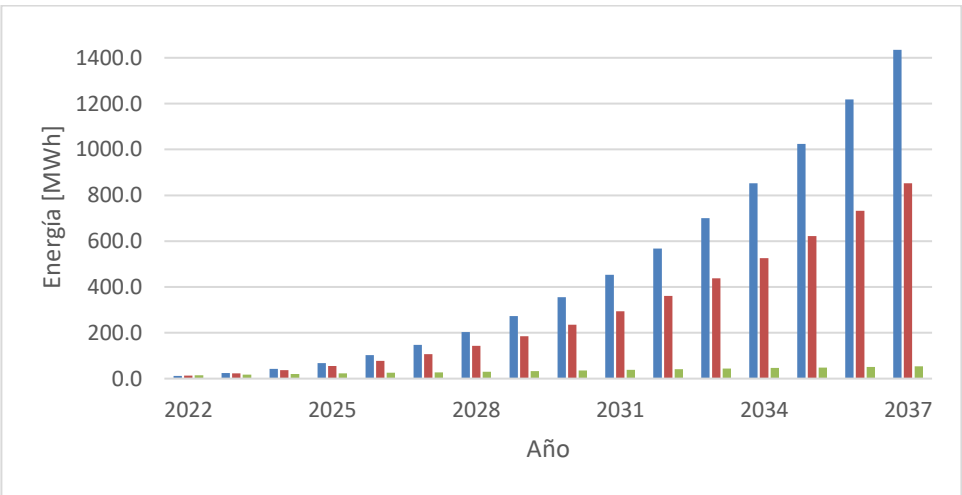
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 32. **Escenario de demanda de energía mínima en un día debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas**



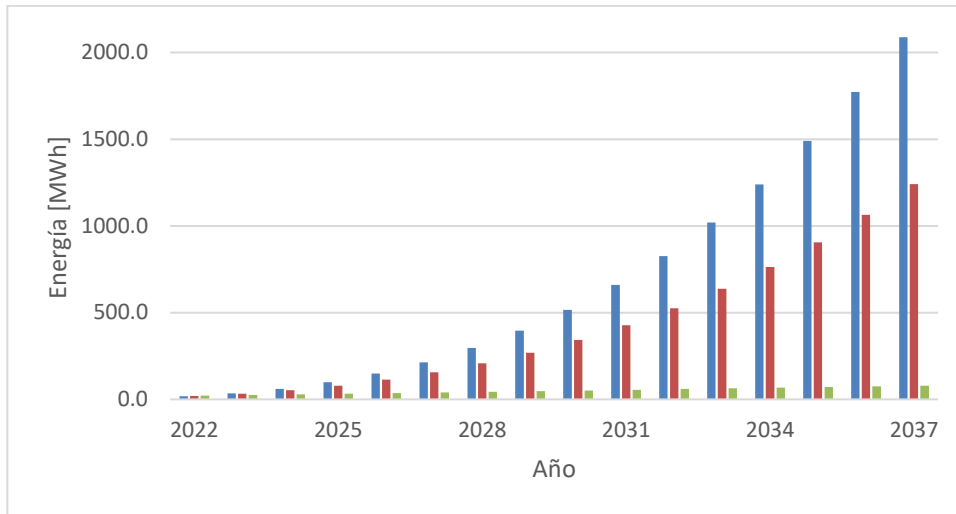
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 33. **Escenario de demanda de energía media en un día debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 34. **Escenario de demanda de energía máxima en un día debido a recarga de vehículos eléctricos en estaciones públicas**

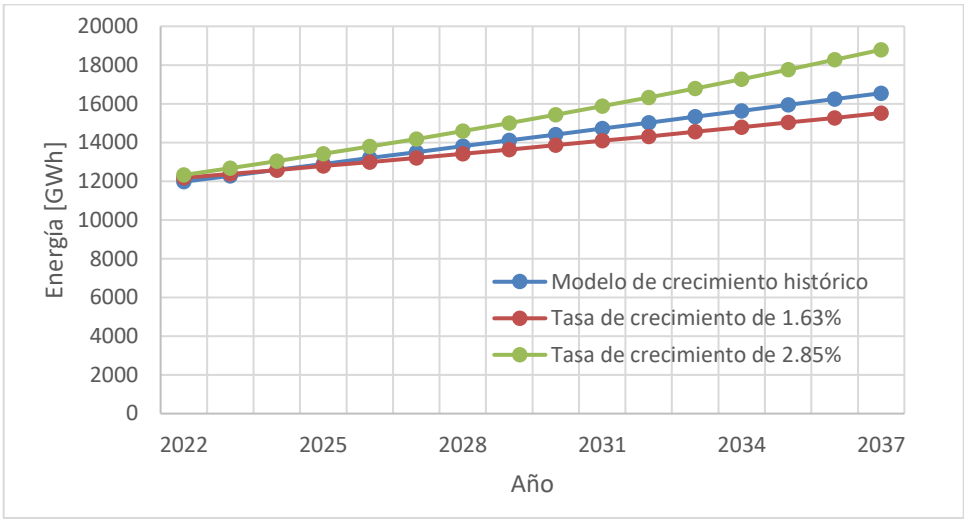


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.4. **Determinación del impacto de la recarga vehicular pública en el sistema nacional interconectado**

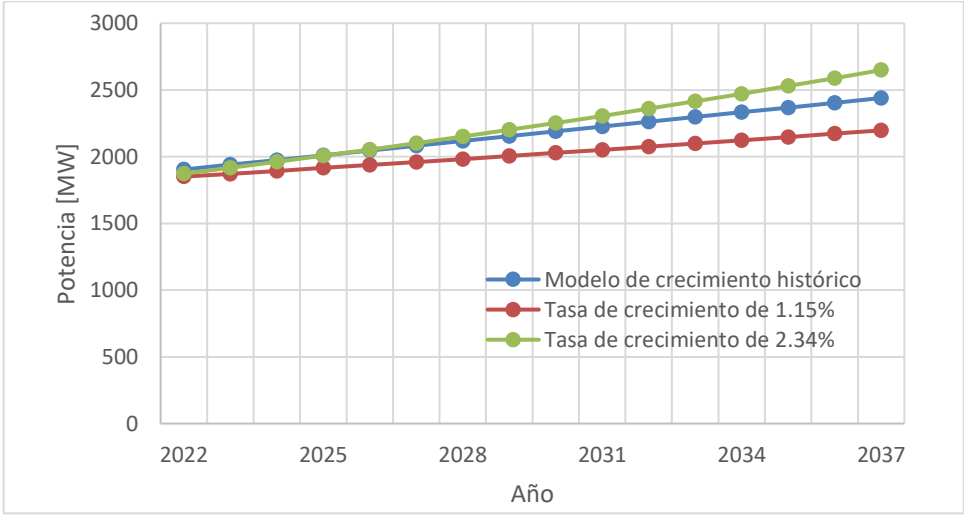
El proceso que se siguió para obtener los resultados que se presentan a continuación está definido en la sección 3.4.5 del desarrollo de la investigación.

Figura 35. **Crecimiento proyectado de demanda de energía anual en el SNI**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 36. **Crecimiento proyectado de la demanda máxima de potencia en el SNI**

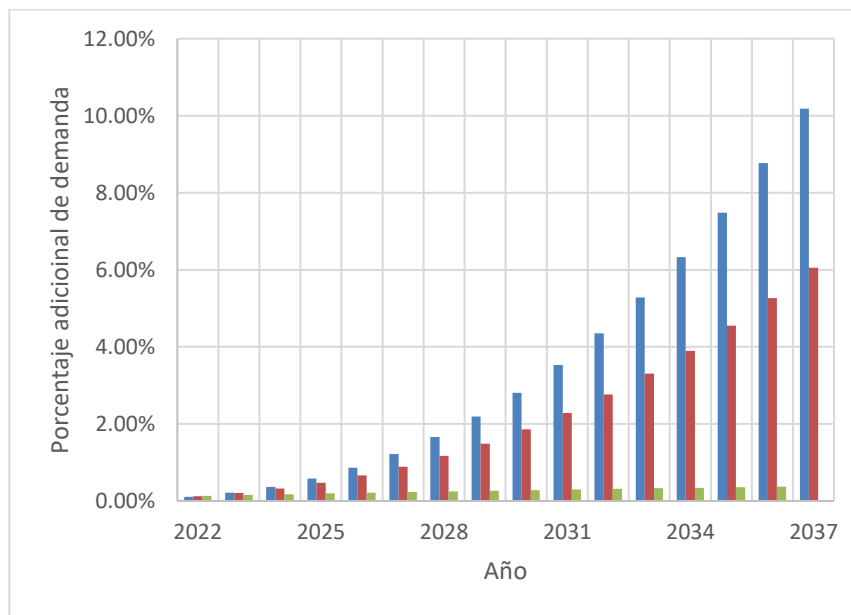


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.4.1. Resultados utilizando proyección con base en modelo histórico

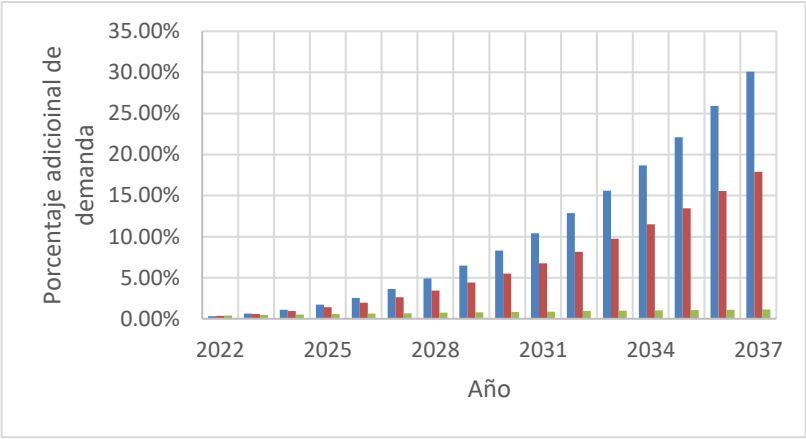
Los resultados presentados a continuación toman en consideración un crecimiento de la demanda de potencia y energía basado en el modelo de las figuras 5 y 6 respectivamente.

Figura 37. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima**



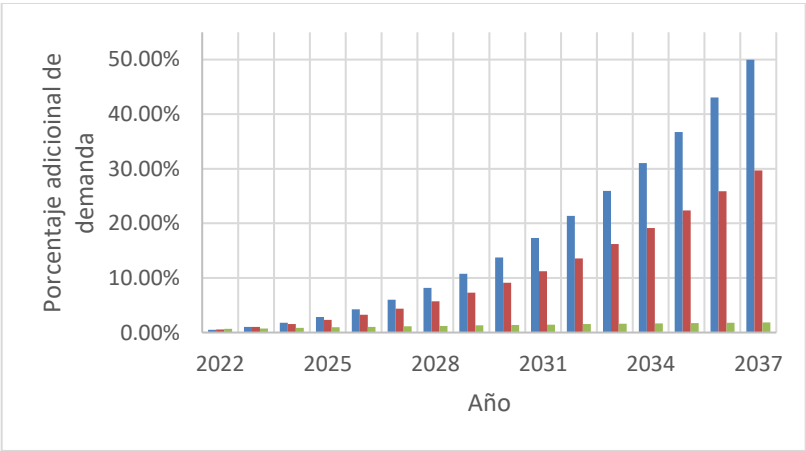
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 38. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media**



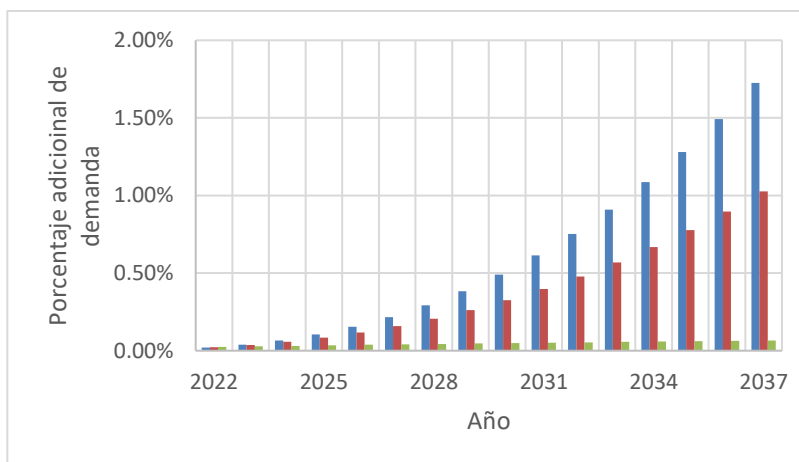
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 39. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima**



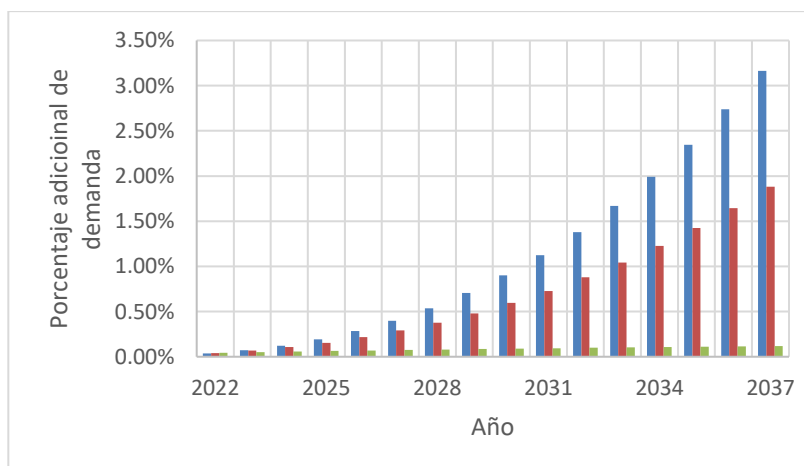
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 40. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima**



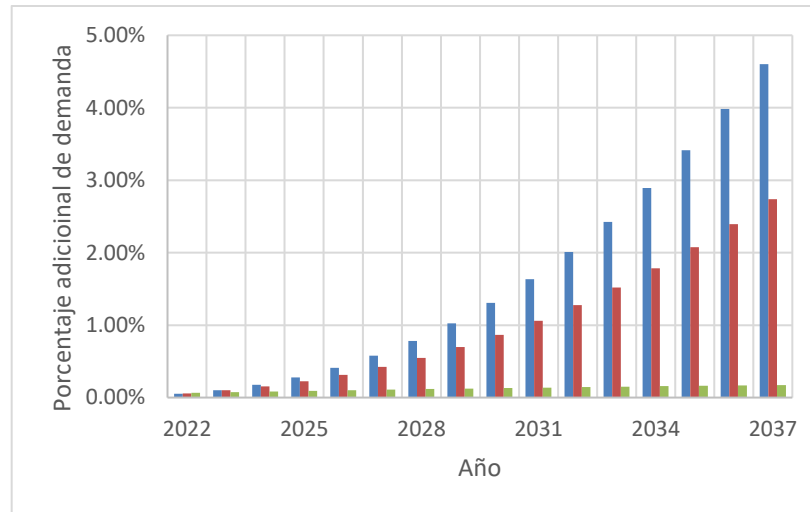
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 41. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 42. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima**

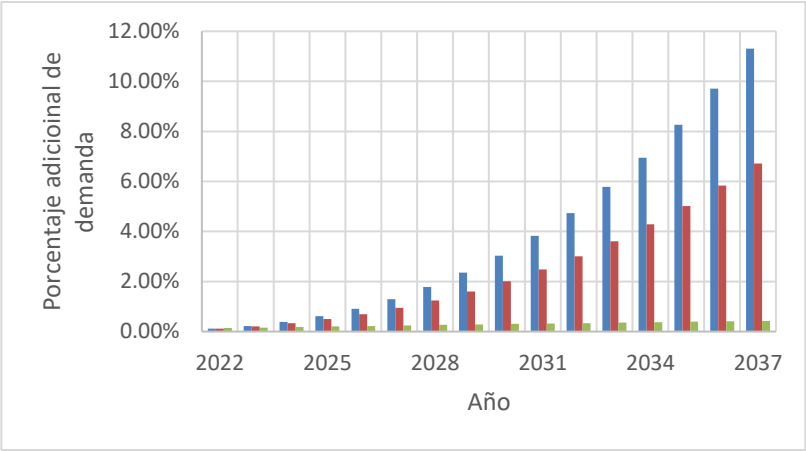


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.4.2. Resultados utilizando proyección con base en crecimiento bajo establecido por el MEM

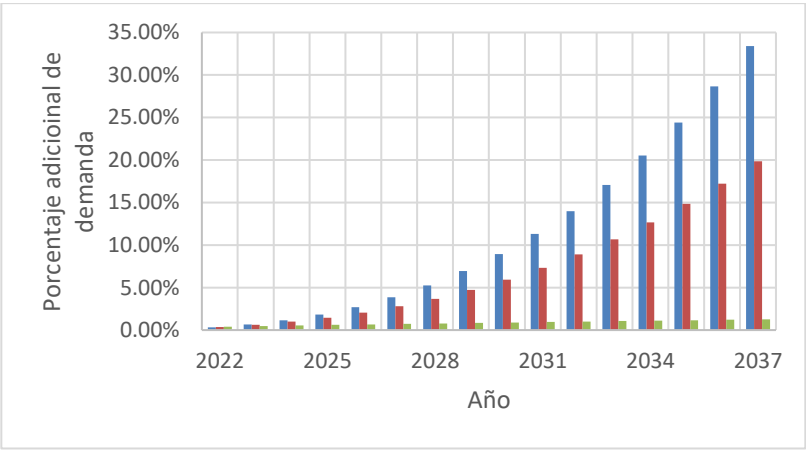
Los resultados presentados a continuación toman en consideración un crecimiento de la demanda de potencia y energía basado en un crecimiento bajo establecido por el MEM.

Figura 43. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima**



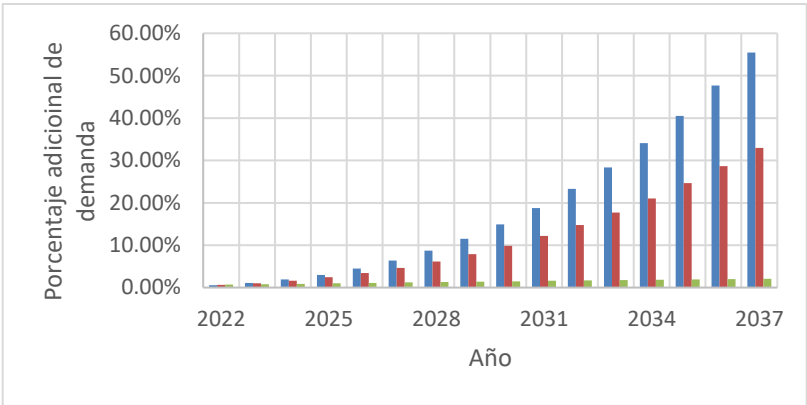
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 44. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media**



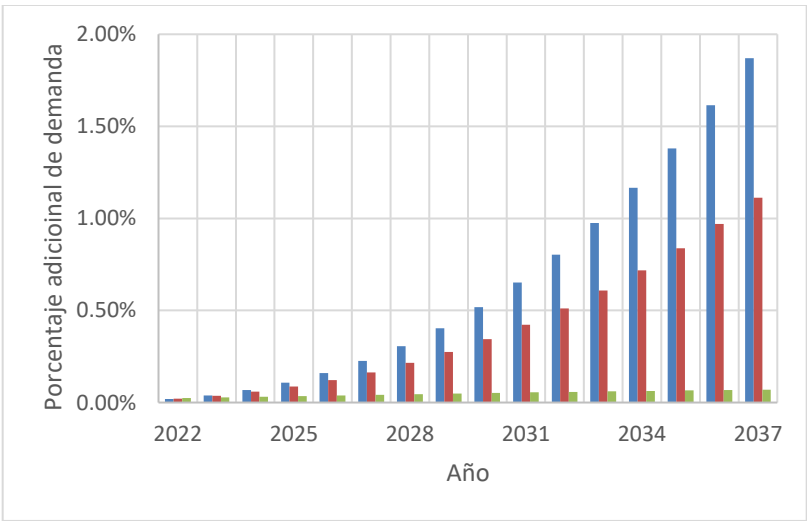
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 45. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima**



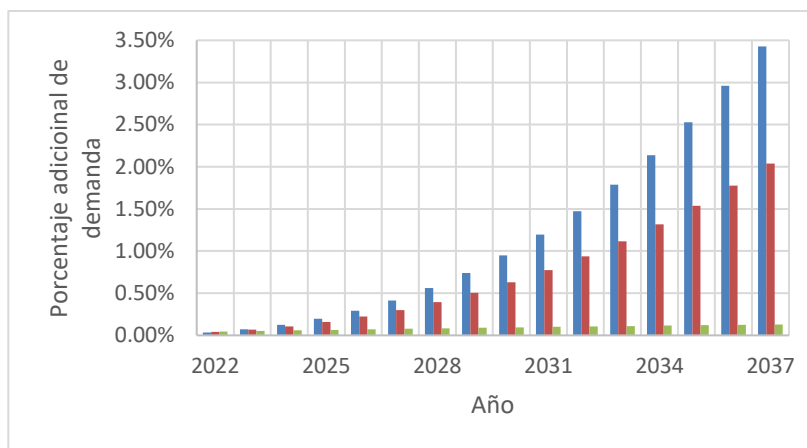
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 46. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima**



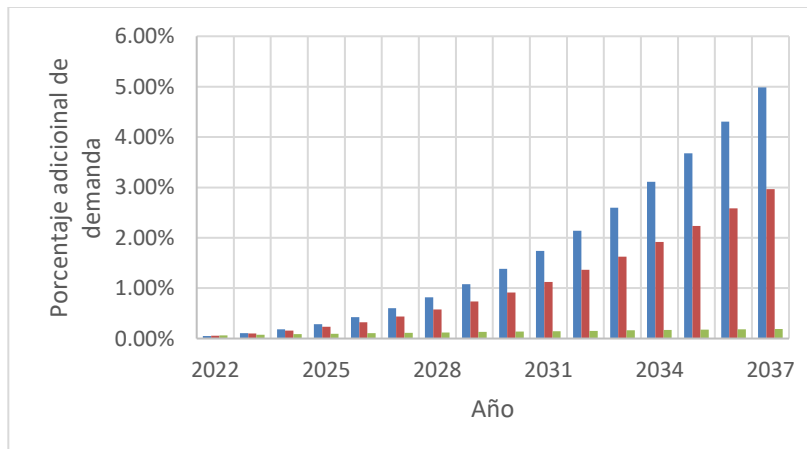
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 47. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos**
escenario de demanda media



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 48. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos**
escenario de demanda máxima

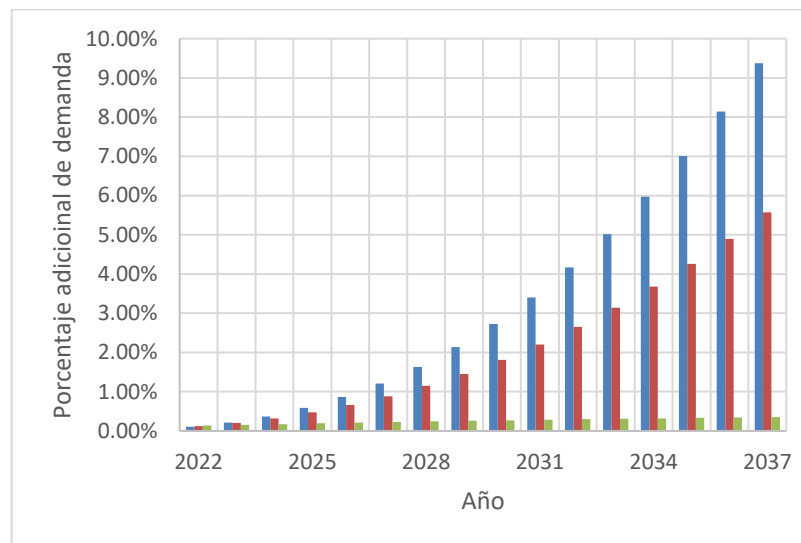


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.4.3. Resultados utilizando proyección con base en crecimiento medio establecido por el MEM

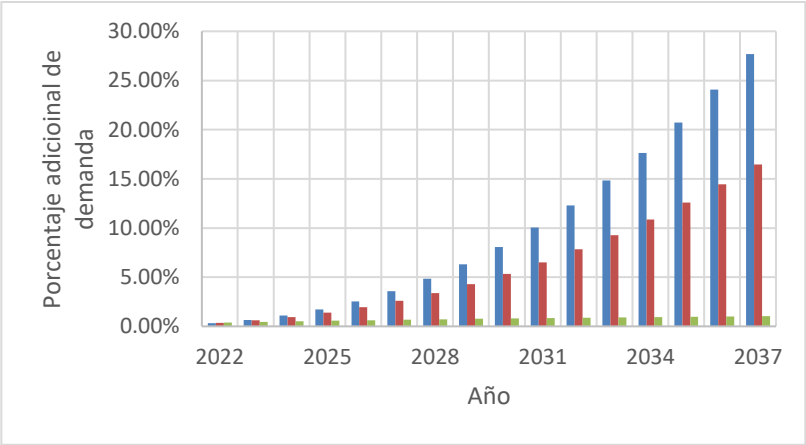
Los resultados presentados a continuación toman en consideración un crecimiento de la demanda de potencia y energía basado en un crecimiento bajo establecido por el MEM.

Figura 49. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima**



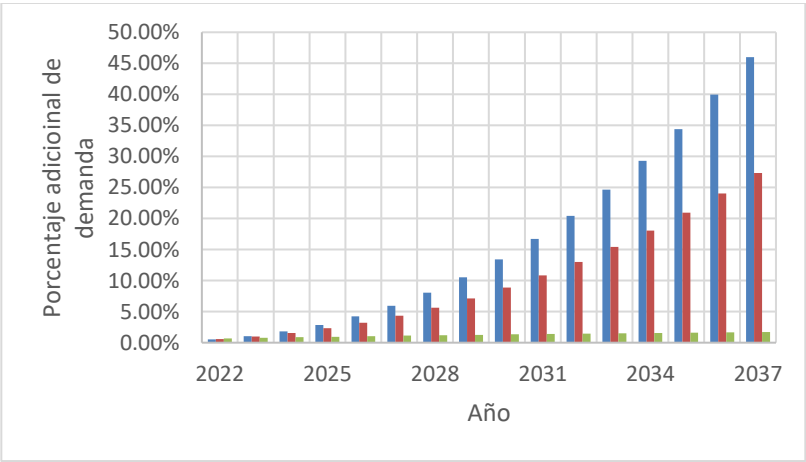
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 50. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos**
escenario de demanda media



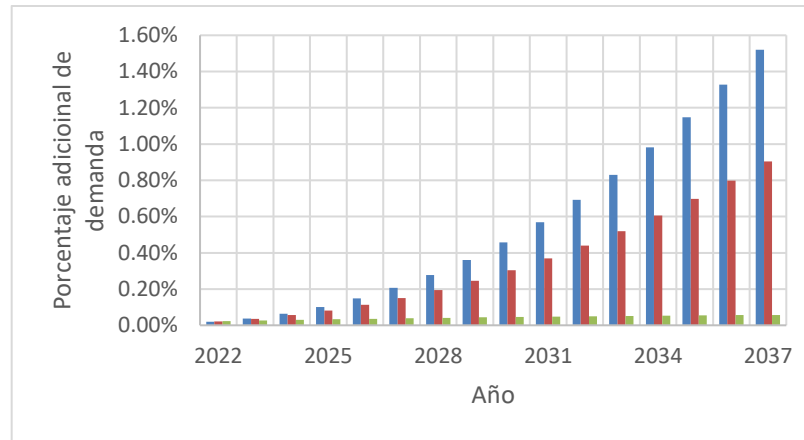
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 51. **Aumento porcentual de la demanda de potencia máxima en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos**
escenario de demanda máxima



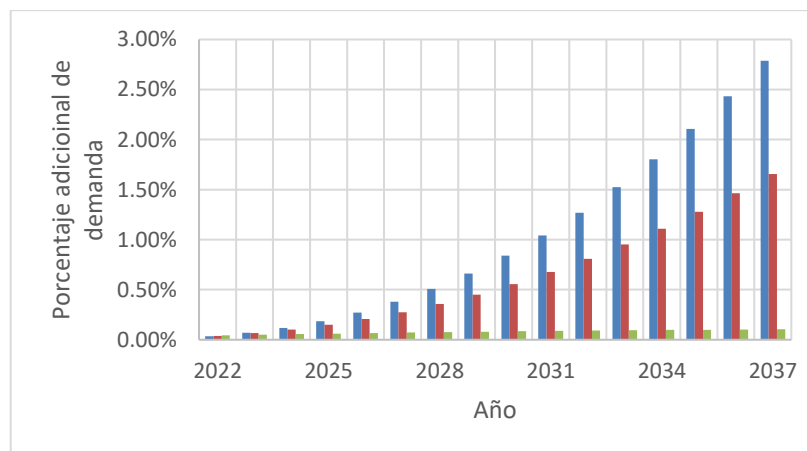
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 52. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda mínima**



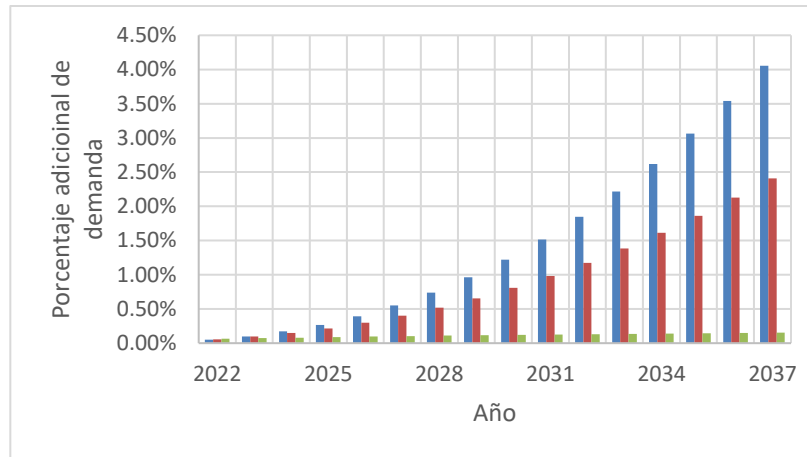
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 53. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda media**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 54. **Aumento porcentual de la demanda de energía anual en el SNI debido a la recarga pública de vehículos eléctricos escenario de demanda máxima**

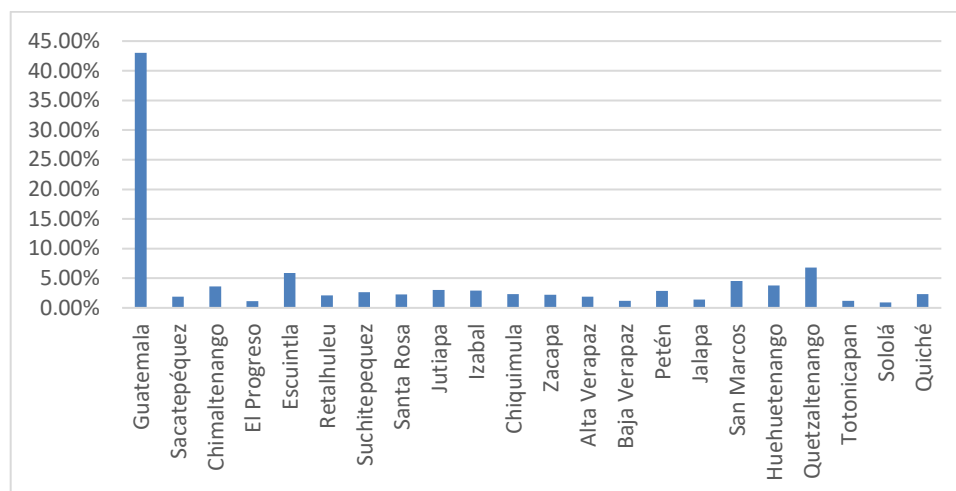


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.5. **Ubicación de nodos y líneas con problemas de cargabilidad y/o regulación de tensión y que podrían no soportar el aumento de demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos**

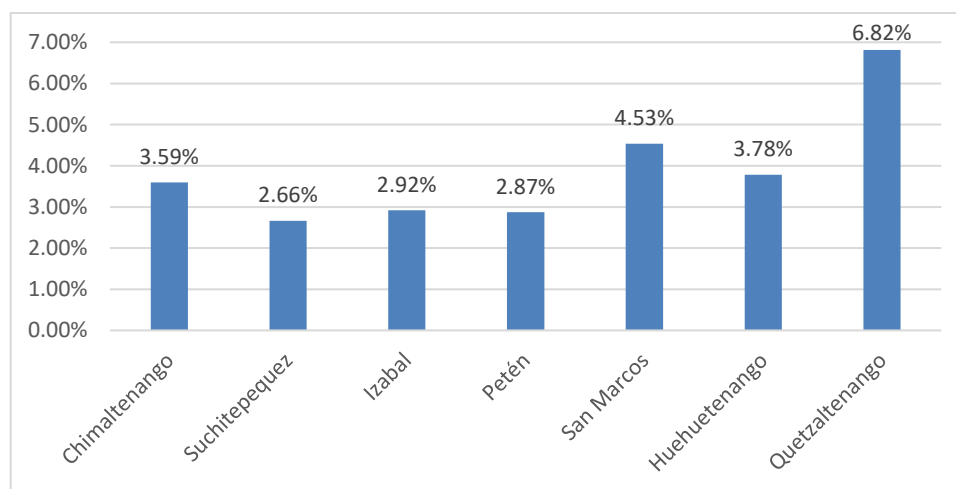
El proceso que se siguió para obtener los resultados que se presentan a continuación está definido en la sección 3.4.5 del desarrollo de la investigación.

Figura 55. Parque de vehículos en Guatemala a julio 2022 por departamento



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 56. Porcentaje de vehículos en departamentos con inconvenientes en sistema de transmisión debido al incremento de la demanda de potencia y energía



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla IX. Elementos del sistema de transmisión con problemas de regulación de tensión o cargabilidad debido a crecimiento de la demanda para el periodo 2020-2034

Departamento	Elemento	Nombre	Observación
Petén	Subestación	Petén Ixpampajul	Regulación de tensión en demanda máxima, época seca
		La libertad	Regulación de tensión en demanda máxima, época seca
	Línea	Circuito de distribución	
		Melchor de Mencos	Línea de distribución de 70 km
Izabal	Subestación	Puerto Barrios	Regulación de tensión en demanda máxima, época seca
		Santo Tomás de Castilla	Regulación de tensión en demanda máxima, época seca
		Genor	Regulación de tensión en demanda máxima, época seca
Suchitepéquez	Subestación	Mazatenango	Cargabilidad
Huehuetenango	Subestación	San Sebastián Coatán	Regulación de tensión en demanda mínima, época seca
		Jacaltenango	Regulación de tensión en demanda mínima, época seca
		Camoja	Regulación de tensión en demanda mínima, época seca
		Barillas	Regulación de tensión en demanda mínima, época seca
		Chiantla	Regulación de tensión en demanda mínima, época seca y húmeda
		Chimaltenango	Regulación de tensión en demanda máxima, época seca
		Cruz de Santiago	Regulación de tensión en demanda máxima, época seca

Continuación tabla IX.

Quetzaltenango	Subestación	Xelajú	Cargabilidad
			Regulación de tensión en
San Marcos	Subestación	Porvenir	demanda máxima, época seca
		San Marcos	Cargabilidad

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados presentados son analizados en los siguientes apartados con el fin de responder parcial o totalmente las preguntas de investigación planteadas y encontrar una solución al problema de investigación central: la factibilidad técnica de una red de carga pública para vehículos eléctricos. Debido a que se obtuvieron tres modelos de crecimiento del parque vehicular, cada pregunta es respondida para cada modelo y se plantea el escenario más crítico o con mayores consecuencias.

5.1. ¿Cuántas estaciones de carga pública son necesarias para satisfacer el crecimiento del parque de vehículos eléctricos en el país?

Para dar respuesta a esta pregunta se planteó el problema con dos factores relevantes: la cantidad de vehículos en circulación y el tipo de vivienda que predomina en el país. Como indicador se utilizó el estado de la movilidad en países de la región, de Europa y Asia. Los resultados obtenidos se dividieron en 3 modelos de crecimiento a partir del crecimiento histórico de Ecuador, Costa Rica y República Dominicana. Cada modelo representa un crecimiento alto, medio y bajo respectivamente.

En Guatemala el 94.1 % de la población vive en el tipo de vivienda casa formal, según la bibliografía consultada cuanto mayor es la cantidad de personas viviendo en casa formal menor es el requerimiento de recarga pública. Esto se debe a que la mayoría de las personas recarga su vehículo por las noches cuando está de regreso en casa. Por lo tanto, la cantidad de vehículos por

estación de recarga pública debe ser mayor, no existe una fórmula como tal que indique la relación adecuada entre estos dos valores, sin embargo, sí se dispone de un rango que se considera adecuado para los mercados actuales.

De esta cuenta fue que se definió un factor adecuado para el país de 27 vehículos por estación de carga pública. Se consideró que, en el caso de flotillas de empresas, la recarga de sus vehículos se realizaría de forma privada dadas las condiciones del mercado de energía eléctrica, ya sea como grandes usuarios o como usuarios regulados. También se consideró que la mayoría de los usuarios utilizaría recarga en casa dado el tipo de vivienda predominante. Por lo tanto, las estaciones de recarga serían utilizadas por personas que no disponen de recarga en casa y por personas que realizan viajes interdepartamentales. También se consideró que un número reducido de personas con carga en casa utilizarán eventualmente la recarga pública, por beneficio económico o por necesidad.

Esto dio como resultado un crecimiento de las estaciones de recarga pública en un factor igual al crecimiento del parque de vehículos eléctricos donde el factor fue definido por el tipo de vivienda. En el escenario alto la cantidad de estaciones de carga superan las 1000 unidades después del 2030 y superan las 3500 unidades al final del período de estudio. De los tres escenarios planteados se considera este el más adecuado tomando en consideración el crecimiento del parque vehicular a nivel mundial. En el escenario medio se superan las 1000 unidades después del 2033 y para el final del periodo de estudio se tendrían arriba de 2000 unidades. El escenario bajo es descartado debido a su baja probabilidad de ocurrencia dadas las condiciones actuales del mercado de vehículos a nivel mundial y de las condiciones con las que se cuenta en el país.

La cantidad de estaciones de recarga rápida dependen del tipo de movilidad que se tenga en el país. Se consideró que las estaciones de carga

pública estarán dispersas en el país de acuerdo con la cantidad de vehículos en circulación que habrá en cada departamento, es decir que en cada departamento la cantidad de vehículos y de estaciones públicas obedecerá a los porcentajes mostrados en la figura 55. El criterio utilizado para establecer la cantidad de estaciones de carga rápida fue el mismo que para el número de estaciones públicas. Nuevamente se considera como valor adecuado el presentado para el modelo de crecimiento alto y se descartan los resultados del crecimiento bajo.

5.2. ¿Qué escenarios de demanda de potencia y energía se pueden presentar ante la probabilidad de distintos requerimientos de carga a lo largo del día?

Los posibles escenarios de demanda de potencia dependen de la cantidad de vehículos que estén conectados en un momento determinado a la red, del tipo de carga (semi rápida y rápida) y del tipo de batería de cada vehículo, las probabilidades son amplias, sin embargo, en el estudio se consideraron únicamente los escenarios de mayor incidencia para el sistema y se dividieron en tres posibilidades: demanda mínima, media y máxima. Para establecer los escenarios se consideró que cada estación de recarga tiene cinco cargadores. En el escenario de demanda mínima se consideró que todos los cargadores del sistema están en uso al mismo tiempo demandando el valor mínimo de potencia del rango que se encontró en la bibliografía consultada. Cada demanda mínima fue planteada para los escenarios de crecimiento alto, medio y bajo. Se consideró que los resultados más adecuados son los encontrados para el crecimiento alto y medio en los escenarios de demanda mínima y media. Se descartaron los resultados de demanda máxima por considerarse poco probable la posibilidad de que todos los cargadores del país estén en uso al mismo tiempo demandando la máxima potencia posible.

En el escenario de demanda mínima para el año 2037 se obtuvo un valor cercano a 250 MW para el modelo de crecimiento alto y un valor cercano a 150 MW para el modelo de crecimiento medio. Los valores de demanda en este caso empiezan a ser considerables a partir del año 2030 con demandas mayores a 50 MW para ambos modelos.

En demanda media para el año 2037 para el crecimiento alto la demanda de potencia se supera los 700 MW y para el modelo de crecimiento medio se superan los 400 MW. Los valores de demanda empiezan a ser considerables a partir del 2029 superando la demanda de 100 MW en ambos modelos.

En el caso de la demanda de energía se consideró un rango de capacidad de las baterías de vehículos eléctricos que se encuentran actualmente en el mercado. Al igual que para la potencia, se dividió en escenarios de demanda mínima, media y máxima y se consideró que 27 de cada 100 vehículos se cargarían completamente en estaciones de carga pública. Los resultados de los valores de demanda media y máxima se consideraron relevantes tomando en cuenta que la capacidad de las baterías irá en aumento con el paso de los años y considerando con el paso del tiempo los modelos de negocio de las estaciones públicas puedan ser suficientemente competitivos para que más personas carguen su vehículo de esta forma. El modelo de crecimiento de vehículos bajo fue descartado.

Para el modelo de crecimiento medio se tienen valores relevantes de demanda de energía a partir del año 2030 para el caso de demanda media y para el año 2029 en el caso de la demanda máxima. En ambos casos se supera la demanda de energía de 200 MWh en un día. El valor máximo de demanda de energía para este modelo en el año 2037 supera los 1200 MWh en un día.

Para el modelo de crecimiento alto se tienen valores relevantes de demanda de energía a partir del año 2029 y 2028 para escenarios de demanda media y máxima respectivamente superando valores de 200 MWh en un día. El escenario máximo de demanda de energía en un día supera los 2000 MWh en el año 2037.

5.3. ¿Cuánta demanda total de potencia y energía se tendría en el país debido a la construcción de una red de carga pública para vehículos eléctricos?

Se determinó con base en la bibliografía consultada que la demanda de potencia y energía debido a una red de carga vehicular pública no está tomada en cuenta en las proyecciones realizadas por el MEM. Se determinó que debido a que no existe un precedente en la demanda de energía histórica del país que sea similar al ingreso de nueva demanda proveniente de vehículos eléctricos, el modelo de crecimiento histórico no podría predecir el aumento de la demanda debido a vehículos eléctricos. Por lo tanto, a los modelos de crecimiento presentados en las figuras 35 y 36 debe añadirse la demanda de potencia y energía que se encontró con anterioridad para determinar cuál sería el crecimiento real para los escenarios planteados. Para este caso se consideró que los escenarios medio y alto son relevantes para el estudio y se descarta el escenario bajo debido a que su incidencia en el crecimiento de la demanda es despreciable.

Tomando en consideración un crecimiento de la demanda basado en el modelo histórico desarrollado en este estudio, y siguiendo la línea de lo discutido en la sección 5.2 respecto a la demanda de potencia se descarta el escenario de demanda máxima. Para la demanda mínima a partir del año 2034 utilizando el modelo de crecimiento alto se empieza a tener una incidencia considerable en el

crecimiento de la potencia de más de 6 % del crecimiento y superando el 10 % para el año 2037. En el caso del modelo de crecimiento medio llegado el año 2037 no se supera una incidencia mayor al 6 %.

Los resultados con mayor incidencia son para el caso de la demanda media, en el cual, para el año 2037 se tiene una incidencia de casi el 30 % para el caso del modelo de crecimiento alto y superior al 15 % para el modelo de crecimiento medio.

Sin embargo, es de notar que la banda de demanda máxima actualmente comprende el periodo de 18:00 a 22:00 h. Y se espera que la demanda de potencia debido a carga pública se dé mayoritariamente en las bandas media y valle, esto debido a las condiciones que presenta actualmente el mercado. Incluso, se prevé que podría darse el caso de que la demanda máxima quede desplazada a un horario entre las 10:00 y las 12:00 h, o bien entre las 14:00 y las 16:00 h que son las horas a las que actualmente se da el pico demanda media.

Para el caso de la demanda de energía anual, utilizando el modelo histórico, la incidencia de la demanda media no supera el 5 % para los modelos de crecimiento alto y medio y no supera el 10 % en el caso de la demanda máxima.

Las mayores incidencias respecto al crecimiento de la demanda de potencia se dan para el modelo de crecimiento bajo determinado por el MEM, en este la demanda de potencia para el modelo de crecimiento alto incide hasta un 55 % en el año 2037, y arriba del 30 % para el modelo de crecimiento medio.

Lo mismo ocurre para el crecimiento de la demanda de energía, la mayor incidencia se da en el modelo de crecimiento bajo determinado por el MEM. El

desglose de todos los escenarios posibles puede verificarse en el apartado de resultados.

5.4. ¿Existen nodos eléctricos o líneas de transmisión en el sistema nacional interconectado que puedan no soportar el aumento de demanda de potencia y energía debido a una red de carga pública para vehículos eléctricos?

Con base en los porcentajes de crecimiento del parque de vehículos eléctricos por departamento, se considera que, no se tendría mayor repercusión en las subestaciones y líneas de transmisión con problemas de cargabilidad o regulación de tensión. Esto debido a que se considera que la demanda de potencia debido a recarga vehicular se tendría en su mayoría en demanda media y demanda valle, mientras que los problemas de las subestaciones y líneas se presentan en demanda máxima.

Por otro lado, para las subestaciones con problemas de regulación de tensión en demanda mínima se considera que el uso de instalaciones de carga pública para vehículos eléctricos podría beneficiar a la red y ayudar a reducir la elevación de la tensión en estas áreas. También se considera que no se tendría mayor incidencia en la línea de distribución del circuito Melchor de Mencos considerando que se tiene planeada la construcción de una nueva línea en 69 kV para este tramo y que la demanda de potencia y energía debido a vehículos eléctricos no es significativa.

5.5. ¿Es factible técnicamente la construcción de una red de carga pública para vehículos eléctricos?

Considerando el escenario de mayor crecimiento de la demanda de potencia, (figura 36) con una tasa de crecimiento de 2.34 %. Se tiene que el total de potencia demandada para el año 2037 sería de 2650 MW.

Para evaluar la factibilidad técnica y dar respuesta a esta sección se tomará en cuenta el escenario de demanda media de potencia utilizando modelo de crecimiento alto del parque de vehículos eléctricos. En este caso la potencia total demandada para el año 2037 sería de 734 MW (figura 30). El total de demanda de potencia para ese año sería de 3384 MW.

Por lo tanto, para ser factible este escenario, el más crítico de los escenarios propuestos que se consideran posibles, el parque de generación debería superar este valor en capacidad instalada efectiva, es de considerar que para enero 2022 la potencia total instalada en el sistema fue de 3381.51 MW (AMM, 2022).

También es de considerar que en el año 2022 se lanzó la licitación abierta PEG-4-2022 para “contratar 235 MW de potencia garantizada como Oferta Firme Eficiente” (CNEE, 2022, p. 9). Tomando únicamente estos datos, es factible técnicamente la instalación de una red de carga pública para vehículos eléctricos. Sin embargo, es de notar que la demanda presentada en este estudio no considera la demanda debido a recarga vehicular en otros ámbitos, (casas o empresas), la cual se prevé que se realice principalmente en horarios de demanda valle, lo cual no implicaría un aumento de la demanda de potencia máxima sino un aplanamiento de la curva de carga horaria, (véase Mazariegos, 2022).

La potencia actualmente instalada y el resultado de la licitación PEG-4-2022 puede considerarse como potencia factiblemente disponible porque no depende de factores externos, es decir, no son previsiones posibles de inversión, como sí lo son las proyecciones de nueva potencia instalada que realiza el MEM en sus planes de expansión. Aun así, se tomará como una posibilidad lo indicado en el Plan Indicativo del Sistema de Generación 2022-2052. Este plan toma en consideración que para el periodo 2022-2052 se tiene un listado de plantas candidatas para ingresar al mercado eléctrico, la capacidad total de este listado es de 2602.30 MW (MEM, 2022).

Por lo tanto, tomando en consideración esta premisa de nueva generación en el sistema, se considera factible técnicamente la instalación de una red de carga pública para vehículos eléctricos, tomando como criterio la capacidad del sistema.

En cuanto a la capacidad del sistema de transporte, se considera que la robustez de este es capaz de soportar el ingreso de nueva demanda, en la tabla IX puede observarse aquellos nodos y líneas que pudieran tener inconveniente para soportar nueva demanda, sin embargo, los planes de expansión del sistema de transporte realizados por el MEM ya consideran las deficiencias del sistema y se preparan para darle solución.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que la cantidad adecuada de estaciones de recarga pública para vehículos eléctricos para el mercado guatemalteco es de 27 vehículos eléctricos por estación de recarga pública. Este número considera el tipo de vivienda en Guatemala y la existencia de tarifas horarias en una de las distribuidoras del país. También considera que las flotillas de empresas utilizarán carga privada en su mayoría.
2. Se estableció que el escenario más crítico para los modelos abordados en este estudio considera un aumento de hasta 734 MW de demanda de potencia y hasta 2087.1 MWh de demanda de energía en un solo día para el SNI debido a recarga pública de vehículos eléctricos en el año 2037.
3. Según los modelos de crecimiento de la demanda que fueron abordados en este estudio se estimó que el porcentaje adicional de demanda de potencia para el año 2037 alcanzaría un 33.4 %. En el escenario de mayor demanda de energía para los modelos estudiados se estimó que el impacto de la carga de vehículos eléctricos en estaciones públicas aumentaría hasta un 4.99 % la demanda anual de energía en el sistema para el año 2037.
4. Se determinó que no existen nodos ni líneas en el SNI que puedan verse afectados por la adición de nueva demanda de potencia y energía proveniente de una red de carga pública para vehículos eléctricos.

5. Se determinó que sí es factible técnicamente la instalación de una red de carga pública para vehículos eléctricos tomando en consideración la adición de demanda de potencia y energía que estos suponen para el sistema según el parque de generación actual, la nueva generación proveniente de la licitación abierta PEG-4-2022 y la proyección de nueva generación instalada elaborada por el MEM.

RECOMENDACIONES

1. Apoyar en la realización de investigaciones en cuanto a la cantidad adecuada de vehículos eléctricos por estación de recarga pública tomando en consideración otras variables que no fueron tomadas en cuenta en este estudio, como la opinión de los potenciales usuarios, el precio de los combustibles y los beneficios fiscales que tiene la ley de incentivos para la movilidad eléctrica esto a cargo de la Facultad de Ingeniería de la USAC.
2. Realizar investigaciones a cargo de la Facultad de Ingeniería de la USAC y al Ministerio de Energía y Minas, respecto a las distintas probabilidades de demanda de potencia y energía proveniente de recarga vehicular eléctrica tomando en consideración un análisis probabilístico con todas las variables que presenta actualmente el sistema de tal manera que se pueda obtener un dato más certero sobre el impacto de la movilidad eléctrica en Guatemala.
3. Considerar como Ministerio de Energía y Minas a partir del año 2023 en todos sus planes nacionales e indicativos el impacto que la movilidad eléctrica tendrá en la demanda de energía para nuevos proyectos de generación y de transporte.
4. Tomar en consideración el Administrador del Mercado Mayorista en sus estudios eléctricos el impacto en la demanda horaria que se tendrá debido a la movilidad eléctrica y la nueva forma de consumo que tendrá

el país debido a esta nueva tecnología, en específico en las bandas valle e intermedia.

5. Tomar en consideración las empresas de distribución que no han implementado tarifas horarias, la nueva demanda que se tendrá en el país debido al crecimiento del parque de vehículos eléctricos, de tal manera que se pueda apoyar esta nueva tecnología con modelos de negocio que beneficien a usuarios, intermediarios y las mismas distribuidoras.

REFERENCIAS

1. Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (s.f.). Carga de vehículos. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://movilidad.ute.com.uy/carga.html#>.
2. Administrador del Mercado Mayorista (2021). *Capacidad Instalada en el sistema eléctrico nacional enero 2021*. Guatemala: Autor. Recuperado de https://www.amm.org.gt/portal/?page_id=145.
3. Administrador del Mercado Mayorista (2022). *Informe estadístico 2021*. Guatemala: Autor. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2021/INFEST20210101_01\(FINAL_PDF\).pdf](https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2021/INFEST20210101_01(FINAL_PDF).pdf).
4. Amadoz, S. (11 de julio, 2021). La autonomía real de los coches eléctricos: 21 modelos a prueba. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://motor.elpais.com/electricos/autonomia-real-coches-electricos/>.
5. Anaya, F. (2018). *Vehículos Eléctricos en Guatemala Análisis y propuesta de implementación*. Guatemala: Autor. Recuperado de <http://www.olade.org/publicaciones/dto-2018-003-vehiculos-electricos-en-guatemala-analisis-de-impacto-y-propuesta-de-implementacion/>.

6. Asociación de Empresas Automotrices de Ecuador (2022). *Sector automotriz en cifras*. Ecuador: Autor. Recuperado de <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2022/07/6.-Sector-en-Cifras-Ingles-Resumen-Junio.pdf>.
7. Asociación de Movilidad Eléctrica de Guatemala (2021). *PepsiCo y Jac Motors, pioneros con camiones 100 % eléctricos*. Guatemala: Autor.
8. Asociación Nacional Automotriz de Chile (2022). *Informe vehículos cero y bajas emisiones julio 2022*. Chile: Autor. Recuperado de https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2022/08/07-ANAC-Informe-vehiculos-cero-y-bajas-emisiones-Julio-2022_v3.pdf.
9. Asociación Nacional de Fabricantes de Vehículos Motorizados (2022). *Brazilian Automotive Industry Yearbook*. Brasil: Autor. Recuperado de <https://anfavea.com.br/anuario2022/2022.pdf>.
10. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (1999). *Normas técnicas del servicio de distribución -NTSD-*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/wp/normas-tecnicas/>.
11. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2022). *Resolución CNEE-118-2022*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/pdf/resoluciones/2022/CNEE-118-2022.pdf>.
12. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (s.f.). *Pliegos Tarifarios*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/Calculadora/pliegos.php>.

13. Datosmacro.com (18 de noviembre, 2022). Población al año 2021. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://datosmacro.expansion.com/demografia/poblacion>.
14. Dulcich, F., Otero, D y Canzian, A. (enero, 2019). Evolución reciente y situación actual de la producción y difusión de vehículos eléctricos a nivel global y Latinoamérica. *Asian Journal of Latin American Studies*, 32(4), 21-51. Recuperado de https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/121829/CONICET_Digital_Nro.abaec9ea-10c8-4b78-8b05-ee90a87b49a5_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
15. Electromaps (15 de septiembre, 2022). Electromaps.com. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://map.electromaps.com/es/>.
16. Fluchs, S. (marzo, 2020). The difusión of electric mobility in the European Union and beyond. *Transportation Research*, 86, 1-26. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920920306490>.
17. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2014). *Guía de Eficiencia Energética en la Movilidad y el Transporte Urbano*. España: Autor. Recuperado de <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2014/07/Guia-de-Eficiencia-Energetica-en-la-Movilidad-y-Transporte-Urbano-fenercom-2014.pdf>.
18. Funke, S., Sprei, F., Gnann, T., y Plötz, P. (marzo, 2019). How much charging infrastructure do electric vehicle need? A review of the

evidence and international comparison. *Transportation Research*, 77, 224-242. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136192091930896X>.

19. Goenaga, O (01 de mayo, 2020). Instalaciones de recarga de vehículo eléctrico. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.voltimum.es/circutor-instalaciones-recarga-vehiculo-electrico>.
20. Hall, D. y Lutsey, N. (25 de febrero, 2020). *Electric vehicle charging guide for cities*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://theicct.org/publication/electric-vehicle-charging-guide-for-cities/>.
21. Hineostroza, O. (2014). *Formulación de un marco regulatorio para la integración óptima del vehículo eléctrico con el sector eléctrico y la movilidad urbana de Bogotá D.C.* (Tesis de maestría) Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
22. Instituto Costarricense de Electricidad (15 de septiembre, 2021). Estaciones de carga eléctrica. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.grupoice.com/wps/portal/ICE/electricidad/estaciones-de-carga>.
23. Instituto Nacional de Estadística (2018). *Características generales de vivienda*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.censopoblacion.gt/censo2018/vivienda.php#>.

24. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022). *Registro administrativo de la industria automotriz de vehículos ligeros*. México: Autor. Recuperado el 12 de septiembre de 2022 de <https://www.inegi.org.mx/datosprimarios/iavl/>.
25. Iwan, S., Allesch, J., Celebi, D., Kijewska, K., Hoé, M., Klauenberg, J. y Zajicek, J. (marzo, 2018). Electric Mobility in European urban freight and logistics - status and attempts of improvement. *Transportation Research Procedia*, 39, 112-123. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146519301012>.
26. Martin, P. (22 de julio, 2021). *Así es el calendario de los fabricantes para acabar con los motores de combustión*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://www.elconfidencial.com/motor/industria/2021-07-22/automovil-combustion-electricos-emisiones-co2_3194856/.
27. Mazariegos, E. (2021). *Evaluación de la matriz de generación, red de distribución y puntos de recarga para la implementación de electromovilidad en la ciudad de Guatemala* (Tesis de maestría). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.
28. Ministerio de Ambiente y Energía (2021). *Vehículos Eléctricos en Costa Rica*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://energia.minae.go.cr/?p=5634>.

29. Ministerio de Energía (2017). *Estrategia Nacional de Electromovilidad*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://energia.gob.cl/electromovilidad/orientaciones-de-politicas-publicas>.
30. Ministerio de Energía y Minas (2017a). *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2019-2032*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/10/08.-Plan-Nacional-de-Eficiencia-Energetica.pdf>.
31. Ministerio de Energía y Minas (2017b). *Plan Nacional de Energía 2017-2032*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/10/15.-Plan-Nacional-de-Energia-2018-2032.pdf>.
32. Ministerio de Energía y Minas (2019). *Política Energética 2019-2050*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/11/Pol%C3%ADtica-Energ%C3%A9tica-2019-2050.pdf>.
33. Ministerio de Energía y Minas (2020). *Plan de expansión del sistema de Generación y Transporte 2020-2034*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/01/Plan%20de%20Expansio%CC%81n%20del%20Sistema%20de%20Generacio%CC%81n%20y%20Transporte%202020-2034.pdf>.
34. Ministerio de Energía y Minas (2022). *Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2022-2052*. Guatemala: Autor. Recuperado

de <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2022/01/PEG-2022-2052.pdf>.

35. Morro-Mello, I., Padilha-Feltrin, A. y Melo, J. (diciembre, 2017). Spatial-Temporal Model to Estimate the Load Curves of Charging Stations for Electric Vehicles. *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America (ISGT Latin America)*. Conferencia llevada a cabo en Quito, Ecuador. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8126693>.
36. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2021). *Movilidad Eléctrica: Avances en América Latina y el Caribe*. Estados Unidos: Autor. Recuperado de <https://movelatam.org/4ta-edicion/>.
37. Recargo inc. (12 de septiembre, 2022). Plugshare.com. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.plugshare.com/es>.
38. Ros, J. y Barrera, O. (2017). *Vehículos eléctricos e Híbridos*. Madrid, España, Editorial Paraninfo.
39. Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México: Mc GRAW-HILL.
40. Silva, F. (noviembre, 2016). Dinamo Técnica, Conducción, en condiciones reales de Galicia, de un vehículo eléctrico con autonomía extendida (REX). *Revista gallega de energía*, (19),12-15. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5828387>.

41. Singh, R. (2021). *Handboook of Electric Vehicle Charching Infrastructure Implementation*. India: Autor. Recuperado de <https://www.niti.gov.in/sites/default/files/2021-08/HandbookforEVChargingInfrastructureImplementation081221.pdf>.
42. Slowik, P. y Lutsey, N. (10 de junio, 2019). The surge of electric vehicles in United States cities [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://theicct.org/publications/surge-EVs-US-cities-2019>.
43. Statista Research Department (2022a). *Número de registros acumulados de vehículos eléctricos vendidos en Costa Rica de 2010 a 2022*. Alemania: Autor. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/1182196/ventas-vehiculos-electricos-costa-rica/>.
44. Statista Research Department (2022b). *Número de vehículos eléctricos de batería (BEV) registrados en la República Dominicana de 2016 a 2021*. Alemania: Autor. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/1182776/registros-vehiculos-electricos-hibridos-republica-dominicana/>.
45. Statista Research Department (2022c). *Número de vehículos eléctricos e híbridos vendidos en Colombia desde 2011 a 2021*. Alemania: Autor. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/1134824/volumen-ventas-vehiculos-electricos-hibridos-colombia/>.

46. Statista Research Department (2022d). *Producto interno bruto por país en América Latina y el Caribe en 2021*. Alemania: Autor. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/1065726/pib-por-paises-america-latina-y-caribe/>.
47. Superintendencia de administración tributaria (s.f.). *Estadísticas Tributarias*. Guatemala: Autor.
48. Superintendencia de administración tributaria (2022). *Expediente UIPSAT No. 102-2022. Resolución No. R-SAT-IAJ-DC-UIP-178-2022*. Guatemala: Autor.
49. Torres, J. (2015). *Estudio de viabilidad en la implementación de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca* (Tesis de licenciatura) Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
50. Tsakalidis, A., Julea, A. y Thiel, C. (noviembre, 2019). The role of infrastructure for electric passenger car uptake in Europe. *Energies*, 12(22), 4348. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/22/4348>.
51. Vera, J., Clairand, J. y Álvarez, B. (septiembre, 2017). Public Policies Proposals for the Deployment of Electric Vehicles in Ecuador. 2017 *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America (ISGT Latin America)*. Conferencia llevada a cabo en Quito, Ecuador. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8126718>.

52. Vermont Energy Investment Corporation (2014). *Electric Vehicle Charging Station Guidebook Planning for Installation and Operation*. Estados Unidos: Autor. Recuperado de <https://www.ccrpcvt.org/wp-content/uploads/2016/01/20140626-EV-Charging-Station-Installation-Guide.pdf>.
53. Wang, N., Pan, H. y Zheng, W. (julio, 2017). Assessment of the incentives on electric vehicle promotion in China. *Transportation Research*, 101, 177-179.
54. Zarazua, G., Noel, L., Kester, J., y Sovacool, B (marzo, 2019). The market case for electric mobility: investigating electric vehicle business models for mass adoption. *Energy*, 192,1-22. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219325368>.