



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE GENERACIÓN, RED DE DISTRIBUCIÓN, Y PUNTOS DE
RECARGA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROMOVILIDAD EN LA CIUDAD DE
GUATEMALA**

Ing. Edson Omar Mazariegos Marcial

Asesorado por el Mtro. José Rafael Argueta Monterroso

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE GENERACIÓN, RED DE DISTRIBUCIÓN, Y PUNTOS DE
RECARGA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROMOVILIDAD EN LA CIUDAD DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. EDSON OMAR MAZARIEGOS MARCIAL

ASESORADO POR EL MTRO. ING. JOSÉ RAFAEL ARGUETA MONTERROSO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

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. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Benedicto Estuardo Martínez Guerra
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:

EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE GENERACIÓN, RED DE DISTRIBUCIÓN, Y PUNTOS DE RECARGA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROMOVILIDAD EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 27 de enero de 2020.

Ing. Edson Omar Mazariegos Marcial

DTG. 353.2021.

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 Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE GENERACIÓN, RED DE DISTRIBUCIÓN, Y PUNTOS DE RECARGA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROMOVILIDAD EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el Ingeniero: **Edson Omar Mazariegos Marcial**, estudiante de la **Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, agosto de 2021.

AACE/asga



Guatemala, Agosto 2021

EEPFI-1119-2021

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 y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE GENERACIÓN, RED DE DISTRIBUCIÓN, Y PUNTOS DE RECARGA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROMOVILIDAD EN LA CIUDAD DE GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero **Edson Omar Mazariegos Marcial** quien se identifica con Carné **201313771** correspondiente al programa de **Maestría 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, Agosto 2021

EEPFI-1120-2021

Como Coordinador de la **Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados**, doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE GENERACIÓN, RED DE DISTRIBUCIÓN, Y PUNTOS DE RECARGA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROMOVILIDAD EN LA CIUDAD DE GUATEMALA”** presentado por la Ingeniero **Edson Omar Mazariegos Marcial** quien se identifica con Carné 201313771.

Atentamente

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, Agosto 2021

EEPFI-1121-2021

En mi calidad como asesor del profesional **Edson Omar Mazariegos Marcial** quien se identifica con Carné **201313771** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"EVALUACIÓN DE LA MATRIZ DE GENERACIÓN, RED DE DISTRIBUCIÓN, Y PUNTOS DE RECARGA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROMOVILIDAD EN LA CIUDAD DE GUATEMALA"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. José Rafael Argueta Monterroso
Asesor

José Rafael Argueta Monterroso
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 2913

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas sus bendiciones en mi vida y nunca desampararme.
- Mis padres** Irma Marcial y Rafael Mazariegos, por motivarme siempre, apoyarme de forma incondicional y por su amor que me condujo hasta dónde me encuentro.
- Mis hermanos** Paola, Rafael y Luis Mazariegos, por su ayuda y soporte durante toda mi vida.
- Mi abuela** Francisca Campos, por su ayuda y apoyo incondicional en cada una de mis metas.
- Mis amigos** Gracias por ser una importante influencia y apoyo en esta etapa, espero tenerlos el resto de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios, formarme a nivel superior y brindarme la oportunidad de ser un profesional.
Facultad de Ingeniería	Por la formación recibida en la disciplina que me apasiona.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por darme la oportunidad de formarme académicamente.
Mi familia	Por alentarme siempre a seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XV
OBJETIVOS	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1. Estudios previos.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Electromovilidad.....	3
2.1.1. Reseña histórica de la electromovilidad.....	4
2.1.2. Vehículos eléctricos.....	6
2.1.3. Autobuses eléctricos	7
2.1.4. Motocicletas eléctricas	8
2.2. Conceptos fundamentales de los vehículos eléctricos	8
2.2.1. Tipos de vehículos eléctricos.....	8
2.2.1.1. Vehículo eléctrico de baterías.....	9
2.2.1.2. Vehículo eléctrico de autonomía extendida.....	10
2.2.1.3. Vehículo híbrido enchufable	11
2.2.1.4. Vehículo híbrido.....	12

2.2.2.	Componentes del sistema de tracción en un vehículo eléctrico	13
2.2.3.	Baterías usadas en vehículos eléctricos	15
2.2.3.1.	Batería de plomo y ácido.....	17
2.2.3.2.	Batería níquel e hidruro metálico	18
2.2.3.3.	Baterías de iones de litio	19
2.3.	Carga de automóviles eléctricos	19
2.3.1.	Tipos de recargas	21
2.3.1.1.	Recarga lenta.....	21
2.3.1.2.	Recarga media o acelerada	21
2.3.1.3.	Recarga rápida.....	22
2.3.1.4.	Intercambio de batería.....	22
2.3.2.	Infraestructuras de recarga	23
2.3.2.1.	Naturaleza de la energía suministrada al vehículo	23
2.3.2.2.	Modo de transferencia de energía.....	23
2.3.2.3.	Flujo de energía	24
2.3.2.4.	Velocidad de recarga.....	24
2.3.2.5.	Conectores para los centros de recarga de automóviles eléctricos	25
2.3.2.5.1.	EEC 7/4 type F (Schuko).....	25
2.3.2.5.2.	SAE J1772	25
2.3.2.5.3.	VDE-AR-E 2623-2-2 (Mennekes).....	25
2.3.2.5.4.	CHAdeMO.....	26
2.3.2.5.5.	Combo.....	26
2.4.	Sistemas de distribución de energía eléctrica	26
2.4.1.	Clasificación de las redes de distribución	27

2.4.1.1.	De acuerdo con su construcción	27
2.4.1.2.	De acuerdo con voltajes nominales.....	28
	2.4.1.2.1. Redes de distribución secundaria	28
	2.4.1.2.2. Redes de distribución primaria	29
2.4.1.3.	De acuerdo con su ubicación geográfica	29
2.4.1.4.	De acuerdo con el tipo de carga.....	30
2.4.1.5.	De acuerdo con la confiabilidad.....	30
2.4.2.	Transformadores de distribución	32
	2.4.2.1. Características de los transformadores de distribución	32
2.4.3.	Conductores empleados en redes de distribución ..	32
	2.4.3.1. Conductores eléctricos.....	33
2.4.4.	Distorsión armónica.....	33
2.5.	Matriz de generación eléctrica.....	34
	2.5.1. Principales fuentes de generación de energía eléctrica.....	34
	2.5.1.1. Energía solar.....	36
	2.5.1.2. Energía eólica.....	36
	2.5.1.3. Energía hidráulica.....	36
	2.5.1.4. Energía de la biomasa	37
	2.5.1.5. Energía geotérmica	38
	2.5.1.6. Energía térmica	39
	2.5.1.7. Motores de combustión interna	40
2.5.2.	Descripción de la matriz de generación eléctrica del país.....	41

3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	45
3.1.	Enfoque.....	45
3.2.	Alcance	46
3.3.	Diseño	46
3.4.	Unidades de análisis	48
3.4.1.	Variables.....	49
3.5.	Fases del estudio	49
3.5.1.	Fase 1. Revisión documental.....	49
3.5.2.	Fase 2. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar el impacto en la red de distribución	53
3.5.3.	Fase 3. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar el impacto en la matriz de generación de energía eléctrica	57
3.5.4.	Fase 4. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para Identificar las características de los centros de recarga	58
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	61
4.1.	Evaluación de la red de distribución.....	61
4.2.	Evaluación de la matriz de generación	66
4.3.	Puntos de recarga	69
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	71
5.1.	Evaluación de la red de distribución.....	71
5.2.	Evaluación de la matriz de generación	74
5.3.	Puntos de recarga	76

CONCLUSIONES 79
RECOMENDACIONES 81
REFERENCIAS..... 83
ANEXOS..... 91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama del vehículo eléctrico puro	10
2.	Diagrama del vehículo eléctrico de autonomía extendida	11
3.	Diagrama del vehículo híbrido enchufable.....	12
4.	Diagrama del vehículo híbrido	13
5.	Esquema del funcionamiento de un vehículo eléctrico	14
6.	Batería con celdas en serie	16
7.	Matriz de generación de Guatemala 2020.....	52
8.	Comportamiento de la curva de carga BTS con implementación de motocicleta eléctrica.....	63
9.	Comportamiento de la curva de carga BTS con implementación de vehículo eléctrico puro	64
10.	Comportamiento de la curva de carga BTS con implementación de vehículo eléctrico híbrido enchufable	65
11.	Implementación de la electromovilidad en la demanda de la distribuidora en banda punta	66
12.	Proyección de demanda horaria a ser abastecida en el SIN en escenario crítico.....	68
13.	Centros comerciales de ciudad de Guatemala.....	70
14.	Desviación estándar de la demanda horaria	73
15.	Desviación estándar de la demanda horaria del SNI	74

TABLAS

I.	Participación por tipo de tecnología.....	42
II.	Energía producida por tipo de tecnología	42
III.	Técnicas de investigación utilizadas.....	48
IV.	Variables en estudio	49
V.	Descripción de la fase 1	50
VI.	Datos de automóviles en la ciudad de Guatemala	50
VII.	Proyección de vehículos eléctricos.....	51
VIII.	Red de distribución de la ciudad de Guatemala	51
IX.	Matriz de generación de Guatemala 2020	52
X.	Características demográficas de la ciudad de Guatemala.....	53
XI.	Descripción de la fase 2	54
XII.	Carga horaria normalizada de usuarios de EEGSA	54
XIII.	Características consideradas para las motocicletas eléctrica.....	55
XIV.	Características consideradas para el vehículo BEV.....	55
XV.	Características consideradas para vehículo PHEV	56
XVI.	Características técnicas de autobús BEV	56
XVII.	Descripción de la fase 3	57
XVIII.	Generación y consumo de energía en el SNI 2019.....	58
XIX.	Descripción de la fase 4	59
XX.	Escenarios considerados para carga residencial	62
XXI.	Demanda horaria promedio de la distribuidora	62
XXII.	Escenarios considerados para incremento de la demanda a ser abastecida	67
XXIII.	Proyección de demanda crítica a ser abastecida en el SIN.....	67
XXIV.	Producción, consumo de energía 2019 y proyección de consumo de energía implementando electromovilidad.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
h	Horas
km	Kilómetro
km/h	Kilómetros por hora
kW	Kilovatios
kWh	Kilovatios hora
kV	Kilovoltios
m	Metro
V	Voltios

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
BTS	Tarifa baja tensión simple, se aplica a usuarios en general y para cualquier uso de la energía, el usuario que la requiera no deberá sobrepasar una potencia máxima demandada de 11 kW.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Demanda	Cantidad de electricidad que una serie de consumidores necesitan para abastecer sus necesidades.
ICE	Motor de combustión interna.
PHEV	Vehículo eléctrico híbrido.
SAT	Superintendencia de Administración Tributaria.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en voltios.

Transformador

Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.

VEB

Vehículo eléctrico puro.

RESUMEN

La electromovilidad es una de las respuestas que el mundo le ha dado a la necesidad de disminuir la emisión de gases contaminantes en el tema de transporte, en Guatemala ha sido muy lento el avance en la implementación de esta forma de moverse, mientras que en varios países de Europa y Asia ya se encuentra muy avanzado este proceso.

La investigación tuvo como uno de sus objetivos, conocer si en la ciudad de Guatemala existen algunas condiciones esenciales para la implementación de la electromovilidad, de acuerdo con las características de la matriz de generación de energía eléctrica del país, derivado del aumento de demanda, así como conocer la variabilidad a la que la red de distribución se someterá derivado del aumento de demanda, y ubicar los probables puntos de recarga.

Para el efecto, se evaluaron los escenarios más críticos bajo las premisas y supuestos planteados, mediante los cuales se determinó que los usuarios de automóviles eléctricos requerirán hasta 168.72 kWh de energía mensual. Se evaluó el comportamiento de las curvas de demanda de usuarios residenciales de la ciudad de Guatemala, así como la curva de carga del SIN, se estima un aumento en la demanda de energía de hasta 3,056,028.90 kWh para un día en la red de distribución.

Palabras clave: electromovilidad, vehículos eléctricos, motocicletas eléctricas, autobuses eléctricos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contexto general

Los automóviles eléctricos han tomado gran relevancia debido a sus múltiples beneficios, especialmente para el medio ambiente, el cambio climático es una realidad cada día más tangible con afectación en todo el mundo, y estos automóviles ofrecen la posibilidad de reducir las emisiones de gases contaminantes.

El desarrollo tecnológico ha permitido que los automóviles eléctricos tengan una autonomía más extendida, precios más accesibles, mejor confiabilidad, e infraestructura para recargarlos, entre otras características que los hacen más competitivos frente a los automóviles con motor de combustión interna. China es el país que más vehículos eléctricos posee en circulación, seguido por Estados Unidos y Noruega (International Energy Agency, 2019), esto es debido a los compromisos medioambientales que poseen estos países, implementando políticas que incluyen incentivos fiscales, así como desarrollo de infraestructura necesaria.

Descripción del problema

Derivado del contexto en materia de medio ambiente que incluye acuerdos y tratados nacionales como el Decreto Número 7-2013 del Congreso de la República de Guatemala *Ley Marco para Regular la Reducción de la Vulnerabilidad, la Adaptación Obligatoria ante los Efectos del Cambio Climático*

y la *Mitigación de Gases de Efecto Invernadero*, que tiene como objetivo desarrollar propuestas de mitigación de los efectos del cambio climático, como consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo los automóviles con motores de combustión interna uno de los grandes productores de estas emisiones, y teniendo la posibilidad de utilizar vehículos, motocicletas, y autobuses eléctricos.

Con el objeto de disminuir las emisiones de gases contaminantes en materia de transporte, surge la incertidumbre de, si en Guatemala existen las condiciones eléctricas, como capacidad de la red de distribución para abastecer la demanda, o si la matriz de generación es capaz de brindar la energía necesaria para implementar electromovilidad.

Formulación del problema

Pregunta central

- ¿Existen las condiciones necesarias para la implementación de electromovilidad en la ciudad de Guatemala?

Preguntas auxiliares

- ¿Cómo impactaría la implementación de electromovilidad a la red de distribución?
- ¿Cómo impactaría la implementación de electromovilidad a la matriz de generación de energía eléctrica?
- ¿Qué características operativas deberían contemplar los centros de recarga para electromovilidad?

Delimitación del problema

Actualmente la ciudad de Guatemala no cuenta con el desarrollo de infraestructura necesaria para la implementación masiva de electromovilidad, es necesario conocer cómo se comportaría la matriz de generación al aumentar la demanda de energía derivado de la implementación de automóviles eléctricos, resulta necesario conocer la afectación sobre la red de distribución para suministrar esta demanda realizando un análisis sobre la curva de demanda de los usuarios, evaluar en qué medida aumenta la demanda de energía, y conocer qué características deben tener los centros de recarga.

OBJETIVOS

General

Evaluar si existen las condiciones necesarias para la implementación de electromovilidad en la ciudad de Guatemala.

Específicos

- Determinar el impacto en la red de distribución por la implementación de electromovilidad.
- Determinar el impacto en la matriz de generación causado por la implementación de electromovilidad.
- Identificar las características de diseño y operativas que deberían tener los centros de recarga para electromovilidad.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La investigación desarrollada tuvo un enfoque cuantitativo, debido a que se utilizó la recolección y análisis de los datos para afinar las preguntas de investigación, así como medición numérica y análisis estadístico. Con el uso de medidas de tendencia central se establecieron pautas de comportamiento, esto para la evaluación de la red de distribución donde se usaron los valores promedio de consumo de los usuarios mayoritarios de la red de distribución.

Se realizó un diseño de investigación cerrado, debido a que la electromovilidad ha incrementado su presencia a nivel mundial en los últimos años, en tal sentido Guatemala se ha quedado rezagada en la implementación de esta tecnología. Durante el proceso de recolección de datos se obtuvo información sobre el parque vehicular de la ciudad de Guatemala, en cuanto a vehículos, motocicletas y autobuses, así mismo sobre las características de la red de distribución de la ciudad, y de la matriz de generación de energía eléctrica del país.

La investigación tuvo un alcance exploratorio. Debido a que las variables no fueron manipuladas deliberadamente, la investigación posee un diseño no experimental, observando los fenómenos en su ambiente natural, tomando datos del 2019, como el parque automovilístico de la ciudad, o el comportamiento de la matriz de generación o la información sobre los consumos promedio de los usuarios de energía eléctrica.

Las técnicas de investigación utilizadas se basan principalmente en el análisis estadístico a través de las medidas de tendencia central, debido a que

se utilizan mucho la media y la moda para determinar posibles escenarios como el aumento de demanda en los usuarios usando el consumo promedio o las curvas de carga tomadas de referencia.

Con relación a las unidades de análisis se consideraron el parque vehicular de la ciudad de Guatemala y el sistema eléctrico nacional, debido a que fueron los ejes fundamentales de análisis para el desarrollo de la investigación.

En la fase de evaluación de la red de distribución, se consideró el valor promedio de consumo de los usuarios BTS de la ciudad de Guatemala, y el comportamiento de sus curvas de carga. Así mismo, en la fase de evaluación de la matriz de generación, se consideró el valor promedio de la demanda horaria del SNI; para la fase de los puntos de recarga se tomaron en cuenta los datos sobre la cantidad de hogares de la ciudad de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

La electromovilidad está conformada por las formas de transporte que utilizan motores eléctricos para propulsar su movimiento, el uso de esta forma de transporte ha cobrado relevancia a nivel mundial, los compromisos medioambientales como el Acuerdo de París, donde se aborda el cambio climático y las rutas de acción para mitigarlo han colocado a la electromovilidad, como una alternativa en temas de movilización puesto que ayuda a reducir la emisión de gases contaminantes.

En el Acuerdo de París los países firmantes se comprometen a reducir las emisiones de gases contaminantes, Guatemala firmó este acuerdo en 2016, dentro de las acciones que se deben ejecutar para reducir la emisión de gases contaminantes se encuentra un segmento relacionado con la movilidad y el transporte, en el cual se busca promover medios de transporte alternativos, ubicando parqueos y estaciones de servicio para bicicletas y vehículos eléctricos.

La electromovilidad se desarrollará en la medida que se ejecuten acciones que faciliten el uso de esta forma de transporte, países como Noruega poseen incentivos fiscales que favorecen a los usuarios de vehículos eléctricos, en materia de energía una medida que ayudará son las tarifas horarias.

La investigación evaluó algunas condiciones que conllevan la implementación de electromovilidad en el ámbito de la energía eléctrica, planteando un escenario de penetración de mercado ambicioso, para un país en el que todavía no hay planes y políticas establecidas al respecto. Se determinó si bajo las condiciones actuales se podrían implementar los automóviles

eléctricos y qué implicaciones tendría dicha implementación en los usuarios finales del suministro de energía, así como en la red de distribución y matriz de energía que abastece el Sistema Nacional Interconectado.

Se planteó el presente trabajo de investigación con la finalidad de aportar información útil a los usuarios de la red de distribución, así como a los agentes del subsector eléctrico, ya que estos agentes tienen mucho que aportar en cuanto a la implementación de electromovilidad.

La investigación consta de capítulos donde se aborda el fundamento teórico relacionado a estos automóviles, así como del desarrollo de la investigación donde se detalla la información requerida para cada fase de la investigación, luego están los resultados donde se muestran los gráficos y tablas que brindan la información de acuerdo a los objetivos planteados, seguido de la discusión de resultados donde se desglosa a detalle y se explica la interpretación de los resultados obtenidos, para posteriormente concluir y hacer las recomendaciones del caso.

1. MARCO REFERENCIAL

Dentro del marco referencial se toman en cuenta los estudios e investigaciones que se han desarrollado alrededor del mundo en el marco de la implementación de electromovilidad.

1.1. Estudios previos

Vallejo (2017), realiza una descripción acerca de las características y del estado de la infraestructura usada para proveerse de la energía necesaria los automóviles eléctricos en Medellín, Colombia, la ciudad únicamente contaba con dos centros de recarga, el estudio brinda una perspectiva acerca de la manera en que ayudaría contar con más de estos centros de recarga. Realiza una proyección de vehículos eléctricos que se espera circulen en Medellín próximamente, así como un reconocimiento de las estaciones de recarga y las políticas a implementar para mejorar las mismas.

Según Vélez (2017), elaboró un trabajo en el cual se examina el impacto causado por la implementación de vehículos eléctricos en la red eléctrica de distribución, analiza detalladamente las propiedades y componentes técnicos que contemplan los vehículos, así como de la infraestructura necesaria para los lugares donde se realiza la recarga de estos vehículos, realizado sobre dos escenarios diferentes las proyecciones de demanda, y un impacto socio económico. Determinó el número de vehículos eléctricos que podrían ser introducidos en la red objeto de investigación, bajo las condiciones y características proyectadas.

Por su parte, Bohórquez, Díez I., López y Díez A. (2011), realizan un análisis que se centra en las implicaciones que tendría el aumento del uso de vehículos en Colombia, tomando en cuenta algunos escenarios enfocados en los centros de carga del vehículo que podría ser directamente desde la residencia, la comercialización a través de una estación de servicio, tanto propiedad del operador de red como de un tercero, y el modelo de intercambio de baterías, abordando también el tema tarifario analizando los mecanismos que se podrían implementar.

Hoarau y Perez (2019), presentan un análisis sobre los costos e implicaciones en la tarifa de la implementación de los vehículos eléctricos, aborda el impacto de la penetración de vehículos eléctricos y recursos de energía renovable en niveles de tarifa de la red, se calcula con la variación de la tarifa de red, evalúa impactos de la penetración de productores y consumidores de vehículos eléctricos en los cargos de la red, efectos contradictorios entre las adopciones de vehículos eléctricos y recursos de energía renovable; es decir estudia los modelos tarifarios adaptables a las redes inteligentes contemplando los vehículos eléctricos.

Asimismo, Martínez (2011), realiza un análisis sobre las consecuencias que tienen los vehículos eléctricos en la red eléctrica de distribución de Barcelona, España, se analizan las características determinantes en estos vehículos, la movilidad y los dispositivos de almacenamiento de los mismos. Utilizando software y un algoritmo se plantean posibles escenarios, que dan la pauta para determinar una posible demanda de energía eléctrica, evaluando un modelo a través del método de Monte Carlo, y luego procede a evaluar las características técnicas de la red, analizando flujos de carga que podrían darse, y mide el impacto en el medio ambiente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Electromovilidad

La electromovilidad comprende a todas las formas de movilidad a través de automóviles que adquieren su capacidad de movimiento por la energía eléctrica normalmente almacenada en baterías o suministrada por otro dispositivo de almacenamiento. El término electromovilidad conlleva una serie de formas de transporte por lo que podemos hablar de vehículos eléctricos, motocicletas eléctricas, autobuses eléctricos, camiones eléctricos, bicicletas eléctricas, entre otros.

A lo largo de los últimos años este tipo de transporte ha aumentado su presencia en la forma de moverse alrededor del mundo, debido a las múltiples ventajas que tienen sobre los automóviles con motor de combustión interna, tales como la eficiencia, la baja contaminación sonora, y quizás la más relevante, la baja emisión de gases contaminantes, algunos países comprometidos con la disminución de estos gases han fomentado el uso de los automóviles eléctricos favoreciéndolos con políticas de estado que incluyen beneficios fiscales, y tarifas eléctricas horarias que ayudan al sistema eléctrico y al bolsillo de los poseedores de dichos automóviles. Aunado al compromiso medioambiental de algunos países el desarrollo tecnológico ha permitido que el precio de estos automóviles se reduzca, que su autonomía mejore, que su eficiencia y rendimiento sea más elevado, por lo que resultan competitivos frente a los automóviles de combustión interna. La electromovilidad es muy probablemente el futuro en el transporte.

2.1.1. Reseña histórica de la electromovilidad

Esta forma de transporte inició más de un centenar de años atrás, y comenzó con vehículos eléctricos, por lo que al referirnos a los inicios de la electromovilidad se debe principiar por esta clase de automóviles. El motor eléctrico es producto de la invención del científico británico Michael Faraday, quien en el año 1821 construyó dispositivos que generaban rotación electromagnética, su aporte revolucionó el mundo, por su contribución a la ciencia, tecnología e industria (Valenzuela, 2012).

En el siglo XIX, específicamente durante la década de 1830, Robert Anderson, desarrolla el primer vehículo eléctrico, y tuvo problemas con el almacenamiento de energía, el vehículo carecía de autonomía lo que lo hacía poco viable y su evolución y desarrollo se mermaba (Valenzuela, 2012).

Después de transcurrido medio siglo, en 1867 durante la Exposición Internacional de la Electricidad, se dieron a conocer nuevas variantes de automóviles, que marcaban la pauta del desarrollo tecnológico en esta forma de transporte, pero fue hasta 1890 que, William Morrison, fabricó el vehículo eléctrico de cuatro ruedas. Durante los siguientes años se empezó a comercializar los vehículos eléctricos principalmente en Estados Unidos, eran vehículos que no superaban los 32 km/h. En Alemania la marca Siemens también construyó algunos vehículos eléctricos (Vélez, 2017).

Uno de los avances más sobresalientes dentro de la electromovilidad se llevó a cabo por el austríaco, Ferdinand Porsche, quien en el año 1900 durante la Exposición Internacional de la Electricidad, reveló el vehículo eléctrico con un motor en todas las ruedas que poseía, es decir con propulsión en cada una de las ruedas, este invento le dio una nueva perspectiva a la fabricación de estos

vehículos, así mismo, fue el creador del primer vehículo híbrido, con propulsión de gasolina y electricidad (Valenzuela, 2012).

Durante las primeras décadas del siglo XX el vehículo que utiliza motor de combustión interna tuvo algunos avances, en conjunto con la implementación de la forma de fabricar en cadena, desarrollada por el estadounidense Henry Ford, que redujo considerablemente el costo de dichos vehículos, logró que en 1930 el vehículo eléctrico perdiera la batalla contra el vehículo con motor de combustión interna, quedando únicamente los motores eléctricos, para uso en el comercio, industria y labores cotidianas que lo requerían. El vehículo con motor de combustión interna se posicionó plenamente, ayudado por el poco interés en la contaminación que estos producen, el bajo precio del combustible y la poca eficiencia que presentan, así como el hecho que muchas ciudades no contaban con la infraestructura necesaria para abastecerse de energía eléctrica (De la Herrán, 2014).

En la década de 1970 muchos países iniciaron con el proceso de incorporar el transporte eléctrico a su parque vehicular, específicamente vehículos híbridos, es decir vehículos de propulsión con gasolina y electricidad, esto debido a los escasos de petróleo sufrida durante esa época. Los países que prestaron atención en el desarrollo de estos vehículos fueron Estados Unidos y Japón, por lo que Europa deja de ser el referente en cuanto a vehículos eléctricos como lo había sido décadas atrás. En la década de los noventa se inicia la comercialización de modelos como el *Toyota Prius* y el *Honda Insight*, que marcan la pauta para que en la actualidad contemos con una elevada cantidad de opciones de éstos; durante las últimas dos décadas se ha incrementado el uso y comercialización de los vehículos eléctricos derivado de sus innegables ventajas frente a sus homólogos que usan motor de combustión interna (Sanz, 2015).

2.1.2. Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos marcan la historia de la electromovilidad, debido a que representan el primer intento por utilizar motores eléctricos para el transporte, su funcionamiento es aplicado a autobuses eléctricos, camiones eléctricos, entre otros. Una parte medular del vehículo eléctrico lo forma el motor, que será descrito más adelante, y está compuesto por el estator o parte fija y el rotor o parte móvil. Los vehículos eléctricos están diseñados con dos o con cuatro motores ubicados en las ruedas de este.

A diferencia del vehículo con motor de combustión interna, el vehículo eléctrico no utiliza caja de velocidades ni diferencial, es decir, mecánicamente resulta más sencillo. La batería es uno de los elementos más determinantes dentro de un vehículo eléctrico ya que es el dispositivo en el cual se almacena la energía, es la proveedora de energía eléctrica que hará que funcionen los motores, esta deberá tener una capacidad importante de almacenamiento para que el vehículo posea una autonomía considerable. El control eléctrico es el encargado de administrar la energía, por lo que esta parte coadyuva en el rendimiento y autonomía del vehículo. Los frenos del vehículo poseen la característica que no disipan la energía, sino que esta energía se aprovecha para recargar las baterías (Isla, Singla, Rodríguez, y Granada, 2019).

Los vehículos eléctricos superaban los tres millones a nivel mundial para el año 2018, estos han tenido un incremento del 50 % durante los últimos dos años, siendo China, Estados Unidos y Europa los lugares donde más se han incorporado al parque vehicular. Los modelos recientes de los vehículos eléctricos pueden alcanzar una autonomía de hasta 400 kilómetros con una sola recarga de batería. Marcas como Tesla poseen una gran variedad de modelos de estos vehículos, pero las marcas de reconocido prestigio de vehículos de

combustión interna también han apostado por los vehículos eléctricos, marcas como Nissan, Toyota, Mercedes Benz, entre otras comercializan esta clase de vehículos (International Energy Agency, 2019).

2.1.3. Autobuses eléctricos

Los autobuses eléctricos son automóviles con capacidad para transportar un gran número de personas con la característica de poseer propulsión a través de motores eléctricos. Su introducción dentro del parque vehicular se ha dado por los compromisos medioambientales que han tenido algunos países tales como Costa Rica que ha optado por el uso de estos. Los autobuses eléctricos han tenido muy buena respuesta en diversas ciudades de Latinoamérica, como: Medellín, en Colombia; Santiago, en Chile, entre otras. Los autobuses eléctricos son capaces de brindar hasta 200 km de autonomía, debido a las características del transporte público, dichos automóviles pueden ser adquiridos por entidades estatales, lo que hace que su adquisición sea viable y rentable, la implementación de estos autobuses resulta ser una medida directa que los gobiernos pueden tomar para disminuir los gases que causan daño al medio ambiente (C40 Cities Finance Facility , 2018).

De acuerdo con especialistas en temas de autobuses, los autobuses eléctricos presentan las siguientes ventajas frente a los autobuses de combustión interna: menor coste de consumo, espacio mejor distribuido, menor contaminación atmosférica, ayudas y subvenciones de las administraciones públicas, no producen ruidos y mantenimientos económicos. Asimismo, presentan las siguientes debilidades frente a los autobuses de combustión interna: menor autonomía, alto costo del autobús, menor potencia, y el tiempo para almacenar energía es prolongado (C40 Cities Finance Facility , 2018).

2.1.4. Motocicletas eléctricas

Las motocicletas eléctricas son automóviles de dos ruedas y manubrio, con capacidad para transportar una o dos personas con propulsión a través de motores eléctricos. Las motocicletas eléctricas al igual que los vehículos y autobuses han presentado un incremento notable en su comercialización durante los últimos años. En algunos países las instituciones gubernamentales han implementado las motocicletas eléctricas para el cumplir con sus atribuciones, así dar pasos encaminados hacia las formas de transporte que dañan menos el medio ambiente (Artega, Delgado, y Pantoja, 2014).

2.2. Conceptos fundamentales de los vehículos eléctricos

El estudio de la electromovilidad conlleva conocimiento acerca de las piezas más fundamentales de estos automóviles, conocer las particularidades técnicas y comprender la forma en que funcionan, ya que los autobuses y motocicletas funcionan bajo el mismo principio y mecanismo que los vehículos; este capítulo se centrará en conocer las características de los vehículos eléctricos, saber cómo se clasifican, y cómo funcionan algunas de las piezas como los motores, conocer la variedad de modelos de las baterías entre otros.

2.2.1. Tipos de vehículos eléctricos

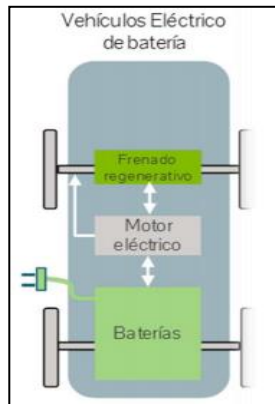
Los vehículos eléctricos se pueden clasificar por sus características constructivas y forma de proveerse de energía, García (2015), lo realiza de la siguiente manera:

2.2.1.1. Vehículo eléctrico de baterías

Llamado también vehículo eléctrico puro, se recarga conectado a la red eléctrica. Es el vehículo con el funcionamiento más elemental, es decir funciona con una batería netamente eléctrica, la cual debe ser recargada al término de la carga. Este tipo de vehículos posee gran aceptación actualmente debido al incremento de centros de recarga que con el avance de la tecnología hacen que el proceso de carga sea más rápido y eficiente. Posee un motor eléctrico, un sistema de control para regular la velocidad y aceleración, el dispositivo para almacenar la energía eléctrica y un sistema de recarga. Por ser netamente eléctricos no necesitan de ningún combustible, por lo que sus emisiones directas de gases contaminantes son nulas, de acuerdo con sus características de fábricas son ideales para uso en lugares céntricos y autopistas por lo que podrían usarse fácilmente en la ciudad de Guatemala. Dichos vehículos necesitan menos mantenimiento que los automotores de combustión interna, porque no requieren cambio de aceite o control de gases, únicamente reemplazo de la batería de acuerdo con el tiempo de vida útil (García, 2015).

Pueden llegar a tener una autonomía de alrededor de 300 kilómetros cuando están totalmente cargados. Pero esta autonomía depende de otros factores como el tráfico y la forma en que es conducido. Según, Hinestroza (2014), dicho vehículo es el que más energía requiere de la red debido a su característica de ser totalmente dependiente de la fuente de energía.

Figura 1. **Diagrama del vehículo eléctrico puro**

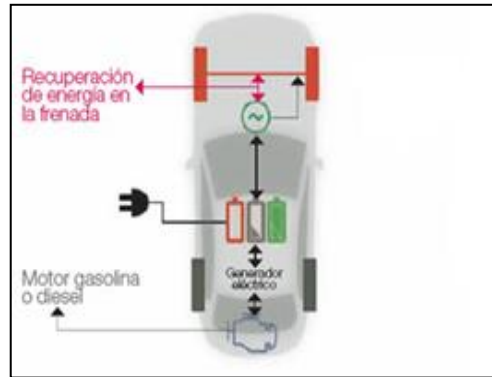


Fuente: IONUT. (2017). *Fotolineras*.

2.2.1.2. Vehículo eléctrico de autonomía extendida

Es un tipo de vehículo muy utilizado, utiliza sus baterías para proveerse de energía y funcionar, también cuenta con un motor pequeño de combustión que carga el motor eléctrico cuando la energía de las baterías es insuficiente, sin intervenir en la propulsión del vehículo, es decir este motor de combustión no suministra propulsión directamente al vehículo únicamente es usado para cargar la batería, el motor eléctrico proporciona la tracción. La autonomía de estos vehículos se puede triplicar en comparación al vehículo eléctrico de baterías o puro por el sistema que provee de carga a la batería (García, 2015).

Figura 2. **Diagrama del vehículo eléctrico de autonomía extendida**



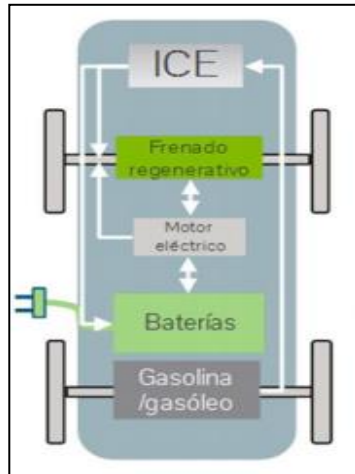
Fuente: VILCACHAGUA. (2018). *El vehículo eléctrico*. Consulta: noviembre 2019. Recuperado de <http://docplayer.es/81347622-El-vehiculo-electrico-ing-jorge-vilcachagua.html>

2.2.1.3. Vehículo híbrido enchufable

Estos vehículos resultan ser una mezcla entre vehículo eléctrico y vehículo de combustión interna. De acuerdo con Hinestroza (2014), el motor eléctrico por lo general posee reducida autonomía, así mismo afirma que pueden tener autonomía en un rango desde los 16 a los 70 kilómetros, al alcanzar el límite autonomía de la carga eléctrica, empieza a trabajar el motor de combustión interna (ICE), que también tiene la capacidad de poder cargar la batería eléctrica al igual que sus homólogos de autonomía extendida, en eso radica su éxito.

Estos vehículos tienen la posibilidad de suministrar potencia a la red y ser suministrados de potencia de la red, es decir son bidireccionales, aunque esta característica tiende a reducir la vida útil de la batería; así mismo posee la característica de freno regenerativo (Giraldo, 2015).

Figura 3. **Diagrama del vehículo híbrido enchufable**



Fuente: IONUT. (2017). *Fotolineras*.

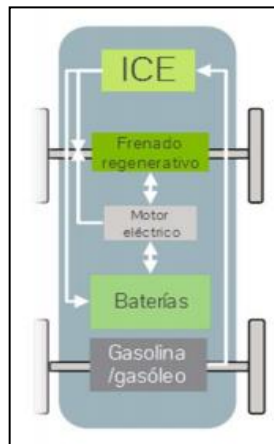
2.2.1.4. **Vehículo híbrido**

Al igual que el tipo anterior estos vehículos cuentan con la posibilidad de funcionar con batería eléctrica, así como con motor de combustión interna (ICE), con la diferencia que estos vehículos no se conectan a la red. Este tipo de almacenamiento de energía no se puede recargar a través de la red, sino que la única forma en la que estos vehículos se recargan de energía es por medio del freno, es decir durante el proceso de desaceleración de este (Hinestroza, 2014).

El motor de combustión interna impulsa a su engranaje y al motor eléctrico donde mediante una variación electrónica de la multiplicación de piñones, regula ambos motores, cuando el vehículo acelera necesita de potencia adicional del motor eléctrico alimentado por las baterías, pero cuando frena, el motor eléctrico recupera parte de la energía cinética. El consumo de combustible se ve reducido entre 25 % y 40 % y su batería puede ser

cargada mediante frenado regenerativo cuando el conductor presiona el freno (Barros y Ortega, 2018, p. 3).

Figura 4. **Diagrama del vehículo híbrido**

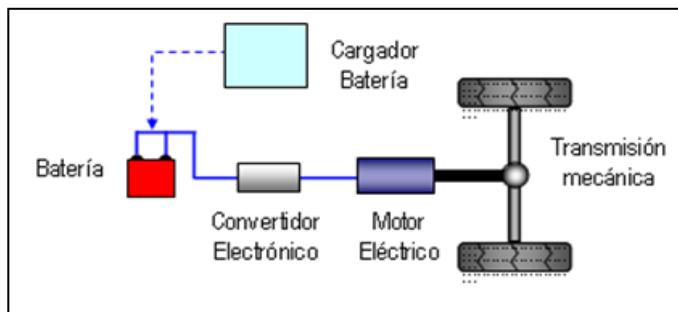


Fuente: IONUT. (2017). *Fotolineras*.

2.2.2. Componentes del sistema de tracción en un vehículo eléctrico

Según Vélez (2017), los vehículos eléctricos poseen un mecanismo más sencillo comparado con los automotores de combustión interna, compuesto por el motor, la batería, controlador electrónico, inversor y un sistema de transmisión, mostrados a continuación:

Figura 5. **Esquema del funcionamiento de un vehículo eléctrico**



Fuente: García. (2012). *Movilidad sostenible: Vehículo eléctrico con pila de combustible*.

Consulta: noviembre de 2019. Recuperado de

<https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2012/05/29/131548#top>.

De acuerdo con García (2015), las partes más representativas del vehículo eléctrico son:

- **Cargador AC/DC:** los vehículos eléctricos necesitan de carga externa para recargar sus baterías. Por ello, cuenta con un cargador que es capaz de transformar la corriente alterna de un enchufe a corriente continua. La carga de corriente depende de la tecnología y de la capacidad de la batería a cargar.
- **Controlador electrónico:** es un elemento fundamental, ya que éste determina y administra la porción de energía que recibe el motor eléctrico de las baterías, y la energía que reciben las baterías cuando la configuración así lo requiere. La energía administrada depende de diversos parámetros, como la posición del pedal de acelerador. El controlador electrónico es el elemento intermedio de las baterías y el motor eléctrico.

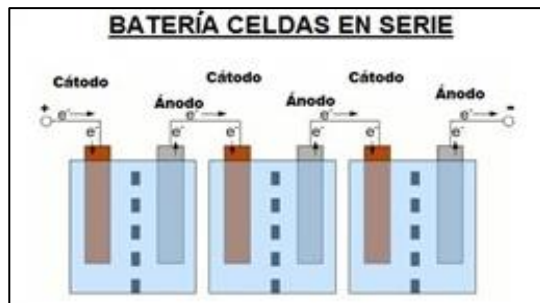
- **Convertor AC/DC:** elemento cuya función es llevar el voltaje de alta tensión a otro de baja tensión para la batería de 12V que se usa para los elementos auxiliares del vehículo.
- **Inversor:** tiene por objetivo realizar la conversión de la corriente continua obtenida de las baterías en corriente alterna para hacer funcionar el motor, y la corriente alterna del generador en corriente continua que se almacena en las baterías, normalmente se encuentra refrigerado con agua (García, 2015).
- **Motor eléctrico:** de acuerdo con García (2015), es un dispositivo rotativo a través del cual la energía eléctrica es transformada en energía mecánica, mediante interacciones electromagnéticas, señala que cuando el procedimiento es inverso, es decir, el dispositivo transforma la energía mecánica en energía eléctrica se le conoce con el nombre de generador. Asimismo, afirma que “el principio que describe la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica por medios electromagnéticos fue demostrado por el científico británico Michael Faraday en 1821” (p. 5).

2.2.3. Baterías usadas en vehículos eléctricos

Gómez, Hernán, Kaul, e Isla (2016), señalan que las baterías son de los componentes más importantes de los automóviles eléctricos, esto porque de las características de estas dependen la autonomía del automóvil, máxima velocidad y tiempo de carga, así mismo son determinantes para el precio y peso de los automóviles eléctricos, actualmente se utilizan más las baterías de iones de litio por su elevado rendimiento.

Las baterías no son más que dispositivos que debido a sus celdas electroquímicas son capaces de almacenar energía eléctrica por medio de reacciones electroquímicas que luego libera. García (2015), señala que necesitan ser suministradas con electricidad, previo a ser utilizadas, algunas particularidades que influyen en las baterías eléctricas es la eficiencia, así como el número de ciclos de vida. Una parte importante de las baterías la conforman las celdas electroquímicas, ya que las baterías pueden estar conformadas por diversas celdas que pueden colocarse en serie, en paralelo, o en una mezcla entre ambas, esto con el fin de incrementar la tensión o la capacidad del dispositivo. Asimismo, señala que las celdas electroquímicas se componen de dos electrodos, un ánodo y un cátodo.

Figura 6. **Batería con celdas en serie**



Fuente: Área tecnología. (2012). *Baterías y acumuladores*. Consulta: octubre de 2019.

Recuperado de <https://www.areatecnologia.com/baterias-y-acumuladores.htm>.

Pallisé, Guillén, Alonso, Van Dijck, Chacón, Amarilla, Soto, Díaz, Sánchez, Corera, García, Alonso, Juárez, Plá de la Rosa, Vegas, López, y Luque, (2009), afirman que las baterías presentan los siguientes parámetros:

- Voltaje: está dado por la diferencia entre los potenciales del ánodo y cátodo. Es muy importante disponer de celdas con alto potencial, ya

que permiten disminuir el número de elementos que se deben conectar en serie para aumentar el voltaje.

- Carga: indica la carga eléctrica que puede almacenar la batería, su unidad de medida es el amperio-hora.
- Energía: este parámetro indica la energía eléctrica que puede almacenar la batería, es proporcional al producto del voltaje por la carga e inversamente proporcional al peso de la batería.
- Ciclos de vida: son el número de ciclos de carga/descarga que se pueden llevar a cabo hasta que la capacidad de la batería sea 80 % de su valor nominal. (p. 119)

Las baterías se pueden clasificar de acuerdo con el elemento químico que utilizan de la siguiente manera:

2.2.3.1. Batería de plomo y ácido

En concordancia, Pallisé *et al.*, (2009), esta batería “Está compuesta por dos electrodos de plomo, cuando la batería está descargada, se encuentra en forma de sulfato de plomo incrustado en una matriz de plomo metálico en el elemento metálico, el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico” (p. 121); este tipo de batería se utilizada en los automotores de combustión interna. Es un dispositivo de recarga lenta, muy pesado, y presenta elevado nivel de toxicidad. Esta batería tuvo sus inicios en 1859, con el físico francés Gaston Plante.

Las principales ventajas que presenta esta batería es la posibilidad de un elevado voltaje, la posibilidad de una elevada potencia por la capacidad que

tienen de suministrar corriente, es una tecnología fácil de implementar, son de bajo valor, esto por su antigüedad, y existen procedimientos establecidos para su reciclaje. Mientras que dentro de sus desventajas están: baja energía específica debido a su peso, ciclo de vida bajo, entre 400 y 800 ciclos, puede presentar desprendimiento de gases durante el ciclo de carga, tiene un fuerte impacto medioambiental por los compuestos del plomo.

2.2.3.2. Batería níquel e hidruro metálico

Pallisé *et al.*, (2009), consideran que estas baterías son el desarrollo de las baterías de níquel y cadmio, pero con mejor capacidad.

Por su parte García (2015), señala que “sus elementos base usan oxihidróxido de níquel (NiOOH), como en la batería de níquel cadmio, pero cuyo cátodo es de una aleación de hidruro metálico. Esto permite eliminar el cadmio, que es muy caro y, además, representa un peligro para el medio ambiente” (p. 125), iniciaron a comercializarse en 1989 y a partir de entonces han tenido un importante avance que ha favorecido su uso en la electromovilidad.

Además, Pallisé *et al.*, (2009), señalan algunas de las ventajas que presenta esta batería que son: mayor energía específica, admiten recargas rápidas, con duración de entre una y tres horas, poseen menor impacto medioambiental que las baterías de níquel y cadmio, y no requieren mantenimiento; consideran las siguientes desventajas: moderado número de ciclos de vida, debido a corrosión en los hidruros metálicos, por lo que su vida útil se encuentra entre los 300 y 600 ciclos de vida, poseen un elevado costo, presentan un moderado efecto memoria, que consiste en que en cada recarga se limita el voltaje impidiendo el uso de la totalidad de su energía, esto debido a un tiempo prolongado de uso, a temperatura elevada, o una gran corriente.

2.2.3.3. Baterías de iones de litio

En concordancia, Pallisé *et al.*, (2009), la primera batería de este tipo se comercializó en 1991, y son el resultado de avances tecnológicos, se usan en teléfonos móviles, computadoras portátiles, tabletas, cámaras, y son probablemente el futuro para dotar de energía a los vehículos eléctricos, debido a sus características en la actualidad son las que más se utilizan.

Las ventajas primordiales que tiene esta batería son: alto voltaje, tienen el mayor voltaje nominal, elevada energía específica, muy superior a los dos tipos mencionados anteriormente, también poseen una gran cantidad de ciclos de vida, ausencia de mantenimiento, tamaños reducidos y bajo impacto medioambiental. Y poseen las siguientes desventajas: precio elevado, pérdida de sus propiedades electroquímicas cuando se encuentra a elevadas temperaturas, poseen baja tolerancia al abuso, es decir son dispositivos que requieren cuidados especiales.

Barros y Ortega (2018) describen que algunas variantes de estas baterías dentro de las que destacan las baterías de polímero de litio, con características como “Densidad energética mayor, una potencia más elevada y además ligeras. Su elevado costo y ciclo de vida reducido no hace que sea una opción clara al momento” (p. 7).

2.3. Carga de automóviles eléctricos

Un aspecto fundamental al hablar de vehículo eléctrico resulta el poder responder a la pregunta ¿dónde es posible recargar su batería?, es necesario conocer si el modelo actual sería capaz de ofrecer suficientes puntos de suministro de energía para todos los vehículos. Los vehículos eléctricos para su

recarga necesitan una fuente que los abastezcan. Una de las condiciones importantes de las infraestructuras de recarga es la capacidad de suministrar energía que posean estas.

La infraestructura de recarga de los dispositivos de almacenamiento de energía depende en buena medida de la ubicación en la que se encuentre, puesto que puede haber centros de recarga privados que son los que podemos ubicar en los hogares, específicamente en los garajes, o en los centros de trabajo, que son los lugares donde se pueden ubicar, también podemos mencionar los centros de recarga localizados en la vía pública, estos centros no son exclusivos, pero resultan ser muy útiles, estos centros también suministran corriente alterna, pero con capacidad de más potencia que los centros de recarga privados, y por último están los puntos ubicados en estaciones de servicio y carreteras, también llamados electrolinerías, estos lugares brindan la posibilidad de recargar rápidamente las baterías, en tiempos de hasta 10 minutos, suministran corriente directa pero con capacidad elevada de potencia, los tiempos de recarga están estrechamente ligados con las características técnicas y operativas de cada batería (Iberdrola, 2017).

Los enchufes usados en la infraestructura de recarga de los automóviles eléctricos típicamente disponen de un conector fase y neutro, y dos conectores más, uno de estado de conexión y otro de comunicación con el automóvil (Maza y Gómez, 2019).

2.3.1. Tipos de recargas

Maza y Gómez (2019), afirman que el tipo de recarga está en función de la rapidez con la que se puede completar la recarga, y también de la cantidad de corriente que se suministre por unidad de tiempo, por lo que podemos mencionar:

2.3.1.1. Recarga lenta

Este tipo de recarga debe su nombre debido a que realiza su función en un tiempo aproximado de entre 5 a 10 horas, que dependerán de las características técnicas de la batería de automóvil. Todos los automóviles poseen la disposición técnica de hacer uso de este modo de recarga. García (2015), detalla que este tipo es la recarga más segura y de fácil acceso, ya que normalmente se realiza en un domicilio a través de un tomacorriente convencional. Su funcionamiento se da con corriente alterna monofásica a una tensión de 120 o 240 voltios (V) y corriente de hasta 16 amperios (A) por fase, con potencias de recarga de entre 2.3 a 7.3 kilovatios (kW), y hasta 11 kilovatios en sistemas trifásicos.

Maza y Gómez (2019), indican que este tipo de recarga es el usado por las motocicletas eléctricas normalmente. El tiempo necesario para una recarga completa de la batería (tipo 24 kWh) ronda entre las 6 y 8 horas.

2.3.1.2. Recarga media o acelerada

Maza y Gómez (2019), señalan que “Este tipo de recarga requiere de potencias más elevadas que las utilizadas en las recargas lentas, por lo que suelen utilizarse conexiones trifásicas con demanda de intensidades de hasta 64 amperios” (p. 37).

Típicamente, este tipo de cargadores requiere de una instalación especial ya que la demanda de energía es mayor que las de recarga lenta, y el cable no puede ser enchufado directamente a la corriente. Brinda la posibilidad de la carga tanto en el hogar como pública, y cuenta con un tiempo de carga promedio que oscila entre 4 y 6 horas (Isla, *et. al.*, 2019).

2.3.1.3. Recarga rápida

Maza y Gómez (2019), con relación a este tipo de recargas señalan que “Demandan una mayor potencia de la red. Se emplea corriente continua, por lo que el cargador es estacionario y no embarcado en el vehículo, con tensiones alrededor de 500 voltios e intensidades reguladas entre 50 y 550 amperios” (p. 37). La batería se recarga en menos de 30 minutos.

Las estaciones de carga de corriente directa se instalan únicamente en lugares públicos ya que deben contar con la infraestructura necesaria para su operación (Isla, *et. al.*, 2019). Esta tecnología requiere de las inversiones necesarias para mantener el lugar con un nivel de seguridad industrial adecuado.

2.3.1.4. Intercambio de batería

Este tipo de recarga es una forma que se ha utilizado con el fin de suplir una emergencia. Y no es más que retirar la batería descargada y reemplazarla por otra batería completamente cargada. No requiere tiempos de espera para recargas (García, 2015).

2.3.2. Infraestructuras de recarga

Como fue analizado con anterioridad existen diferentes formas de realizar la recarga de los automóviles eléctricos. Se debe tomar en cuenta el tiempo de recarga requerido, las características técnicas del automóvil y las condiciones de la red para suministrar la energía necesaria. En ese sentido Maza y Gómez (2019) mencionan y describen algunos de los criterios que se deben tomar en cuenta:

2.3.2.1. Naturaleza de la energía suministrada al vehículo

La energía suministrada por la red es de corriente alterna, entre tanto las baterías utilizan corriente continua, razón por la cual se debe adecuar alguna de las partes para coincidir en el tipo de corriente, esto con un proceso llamado rectificación, y consiste en cambiar la corriente alterna en corriente continua. Puede realizarse dentro o fuera del automóvil, cuando se realiza dentro del automóvil la alimentación es con corriente alterna, y si se realiza fuera del automóvil la alimentación es continua. El tamaño y peso del rectificador dependen de su potencia, por lo que la alimentación en corriente alterna corresponde a potencias bajas típicamente, mientras que la alimentación en corriente continua está asociada a elevadas potencias (Maza y Gómez, 2019).

2.3.2.2. Modo de transferencia de energía

Suministrar energía al automóvil normalmente se realiza por un proceso de conducción, es decir por medio de un conector se une el automóvil con el centro de recarga, aunque también se debe mejorar la tecnología que permite realizar la recarga sin tener en contacto las piezas, esta labor la realiza con un

acoplamiento magnético. Como ya se había mencionado antes existe otra forma de transferir la energía al automóvil, y es cambiando la batería, aunque puede resultar una tarea molesta, hay automóviles que han sido construidos con la posibilidad de hacer uso de este mecanismo de recarga (Maza y Gómez, 2019).

2.3.2.3. Flujo de energía

Típicamente el flujo de energía que alimenta un automóvil se da de la red hacia el vehículo, para realizar dicha función es necesario que el cargador posea un rectificador de onda, que sirve para convertir la señal alterna proveniente de la red en una señal continua que alimente la batería, cabe mencionar que este rectificador debido a su configuración electrónica inyecta distorsión armónica a la red. En la actualidad también se utilizan cargadores bidireccionales, que permiten aportar energía a la red, es decir la energía puede fluir en ambas direcciones, con la ventaja de que inyecta menos distorsión armónica que el cargador unidireccional, y lo que busca esta tecnología es que el automóvil pueda ser utilizado como un medio de reserva, que sea capaz de inyectar energía a la red como un generador distribuido (Maza y Gómez, 2019).

2.3.2.4. Velocidad de recarga

La velocidad de recarga está relacionada con la potencia que se es capaz de suministrar, la cantidad de energía y las características técnicas de la batería. Entre los cargadores de automóviles eléctricos existe la posibilidad de una recarga lenta, semirápida y rápida como fue mencionado con anterioridad (Maza y Gómez, 2019).

2.3.2.5. Conectores para los centros de recarga de automóviles eléctricos

En concordancia con Maza y Gómez (2019) los conectores usados en infraestructura de recarga de los automóviles eléctricos son:

2.3.2.5.1. EEC 7/4 type F (Schuko)

Son usados en recargas lentas, los autores también señalan que son ideales para automóviles pequeños como motocicletas, y bicicletas, poseen conexión a fase, neutro y tierra, es de uso exclusivo para sistemas de una fase con corrientes menores a 16 amperios.

2.3.2.5.2. SAE J1772

Posee las mismas características técnicas del modelo descrito anteriormente, pero con la diferencia que este tiene un canal de comunicación que detecta la conectividad entre el automóvil y el punto de recarga. Permitiendo la posibilidad de cargas semirápidas y lentas.

2.3.2.5.3. VDE-AR-E 2623-2-2 (Mennekes)

Este conector está diseñado para realizar recargas semirápidas, con las mismas características del modelo SAE J1772. Este cargador permite conectarse a un sistema trifásico.

2.3.2.5.4. CHAdeMO

Este conector está diseñado para usarse en recargas rápidas, soporta potencias de 62.5 kilovatios, posee un sistema de comunicación al igual que los modelos mencionados anteriormente.

2.3.2.5.5. Combo

Este modelo funciona de manera similar a los modelos SAE J1772 y del Mennekes, con la diferencia que está diseñado para recargas rápidas y semirápidas.

2.4. Sistemas de distribución de energía eléctrica

El sistema eléctrico está conformado por tres etapas que son: generación, transmisión y distribución, esta última tiene por misión convertir a niveles residenciales el voltaje, así como realizar las actividades de cobro con los usuarios. En Guatemala la Ley General de Electricidad (1996), define los sistemas de distribución como “Conjunto de líneas y subestaciones de transformación de electricidad, destinadas a efectuar la actividad de distribución y que funcionen a los voltajes que especifique el reglamento” y el servicio de distribución se define como “el suministro de energía eléctrica que se presta a la población, mediante redes de distribución, en condiciones de calidad de servicio y precios aprobados por la Comisión” (p. 6).

Ramirez (2004) indica que estos sistemas están conformados por:

- Subestación: es el conjunto de materiales y equipo en el cual se transforma la energía recibida de las líneas de subtransmisión y dan origen a los circuitos de distribución primarios.
- Circuitos primarios: es el conjunto de equipos que recorren cada uno de los sectores urbanos y rurales suministrando potencia a los transformadores de distribución”, con niveles de tensión de 13.2 y 34.5 kilovoltios.
- Transformadores de distribución: son dispositivos fundamentales de las redes de distribución, pues se encargan de convertir el nivel de voltaje de los circuitos primarios a niveles de uso residencial o cualquier tipo de usuario que se conecta al circuito secundario.
- Circuito secundario: sistema conformado por los elementos que se encuentran en el lado secundario del transformador, como conductores, y conectores, entre otros. (p. 3)

2.4.1. Clasificación de las redes de distribución

En concordancia con Ramirez (2004), las redes de distribución se pueden clasificar de acuerdo con las características propias de cada una, como nivel de tensión, tipología, entre otros.

2.4.1.1. De acuerdo con su construcción

Ramirez (2004), señala que las redes de distribución de conformidad a la manera en la que se construyen se pueden dividir en redes aéreas y subterráneas. Las redes aéreas poseen algunas ventajas sobre las subterráneas

como: costo inicial más bajo, fácil mantenimiento, periodo de construcción más breve, y fácil localización de fallas. El sistema aéreo está compuesto por postes, conductores, aisladores, cruce, herrajes, y equipo de protección. Las redes de distribución subterráneas son utilizadas en lugares con condiciones de urbanismo adecuadas, estética, o condiciones de seguridad no se puede emplear un sistema aéreo. Poseen las siguientes ventajas: más seguras, son más estéticas pues no se encuentran a la vista en las calles, no están expuestas al vandalismo, mejor nivel de confiabilidad, pero resultan ser más costosas que las redes aéreas.

2.4.1.2. De acuerdo con voltajes nominales

Las podemos dividir en redes de distribución secundarias y redes de distribución primarias, siendo las secundarias las de voltajes menores.

2.4.1.2.1. Redes de distribución secundaria

En los circuitos secundarios, las tensiones de suministro que Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. proporciona los siguientes voltajes estandarizados:

- 120/240 voltios 1 fase 3 alambres
- 120/208 voltios 1 fase 3 alambres
- 120/240 voltios 3 fases 4 alambres
- 120/208 voltios 3 fases 4 alambres
- 240/480 voltios 3 fases 4 alambres

Asimismo Ramirez (2004), señala que “Para los sistemas industriales y de alumbrado público grandes, que requieren un transformador propio independiente de la red secundaria” (p. 8).

2.4.1.2.2. Redes de distribución primaria

El voltaje nominal para el diseño es de 13.2 kilovoltios entre líneas y 7.62 kilovoltios entre fases. Dentro de las redes de distribución primarias en Guatemala también se utiliza el voltaje de 34.5 kilovoltios entre líneas y 19.92 kilovoltios entre fases, usada en redes de distribución con menos densidad de usuarios.

2.4.1.3. De acuerdo con su ubicación geográfica

En Guatemala se encuentran dos divisiones dentro de esta clasificación, que son servicios urbanos y servicios rurales, de acuerdo con las Normas Técnicas del Servicio de Distribución -NTSD- (1999), que definen estos servicios como:

Servicio urbano: es todo servicio de energía eléctrica que un Distribuidor presta a un Usuario, ubicado en poblaciones que son cabeceras departamentales o municipales o, en su defecto, en aglomeraciones poblacionales o núcleos integrados a las anteriores, en los cuales la distancia entre las Acometidas de estos servicios es menor a cincuenta metros. Y los servicios rurales como: Es todo servicio de energía eléctrica que un distribuidor presta a un usuario, ubicado en poblaciones que no cumplan con las condiciones del servicio urbano. (p. 5)

La diferencia principal en las redes de distribución urbanas y rurales radica en la densidad de los usuarios, puesto que los usuarios de las redes rurales están más dispersos, las redes urbanas poseen la ventaja que se encuentran en lugares de fácil acceso, por lo que las adecuaciones en la red resultan ser más

sencillas, contrario a las redes rurales, que pueden estar en áreas montañosas y de difícil acceso.

2.4.1.4. De acuerdo con el tipo de carga

El consumo de energía es variable entre cada usuario, puesto que cada uno tiene sus necesidades y usos, sin embargo, Ramirez (2004), señala que podemos clasificarlos en cargas residenciales, que abarcan todos los usuarios que utilizan la energía para tareas cotidianas del hogar, dentro de esta clasificación influye el nivel socioeconómico de los usuarios, debido al consumo que puedan tener en función de sus ingresos. También existen las cargas comerciales, que son cargas con consumos más elevados que los residenciales, dentro de esta clasificación se encuentran las oficinas, centros comerciales, entre otros. Así mismo tenemos las cargas industriales, con un nivel de consumo más elevado que las cargas comerciales, estas cargas poseen una componente inductiva importante debido a que se caracterizan por tener motores dentro de sus instalaciones, dentro de esta clasificación se encuentran las plantas de producción, fábricas, entre otros.

2.4.1.5. De acuerdo con la confiabilidad

Esta clasificación corresponde a las actividades que realicen los usuarios, puesto que debido a eso pueden tener más o menos horas de interrupción en el suministro, dentro de estos grupos, Ramirez (2004), menciona las cargas de primera categoría, son todas las cargas en las cuales una interrupción les causa muchísimo daño, por ejemplo, los hospitales, están las cargas de segunda categoría, que son cargas en las cuales una interrupción no mayor a cinco minutos no causa muchos problemas, dentro de esta categoría se puede mencionar a las plantas de producción. Asimismo, añade las cargas de tercera

categoría, que son usuarios que pueden tener interrupciones de hasta cinco horas sin tener grandes pérdidas, inmersos en esta clasificación se encuentran los usuarios residenciales.

2.4.2. Transformadores de distribución

Este es un artefacto cuya funcionalidad se da con corriente alterna, que permite cambiar los valores de voltaje y corriente a valores determinados. Es una máquina estática, robusta, compuesta principalmente por dos arrollamientos, uno primario y otro secundario, un núcleo de material ferromagnético, un sistema de refrigeración para disminuir la temperatura del dispositivo, y aisladores pasantes de salida, que son el punto de conexión con el exterior. Giraldo (2015), señala la importancia de estos dispositivos en las redes eléctricas, ya que cumplen la función de bajar el nivel de voltaje que proviene de la red de transporte a valores de distribución (normalmente 13.2 kilovoltios) para llevar la energía de la subestación a los usuarios, pero antes de llegar al usuario este nivel de tensión sufre otra disminución, dicho valor va depender de las necesidades del usuario, pero los más usados son 120/240 voltios. Es importante considerar el comportamiento de las cargas que se conectaran para elegir el adecuado, tomando en cuenta la máxima potencia, horarios de máxima demanda, comportamiento de la curva de carga, entre otros.

Por su parte Fraile (2003), describe las partes principales de estos dispositivos, siendo estas:

- Núcleo
- Devanados
- Sistema de refrigeración
- Aisladores

2.4.2.1. Características de los transformadores de distribución

De acuerdo con ABB Group (2005), algunas características que distinguen a los transformadores de distribución son:

- Son monofásicos, que pueden agruparse para configuraciones trifásicas.
- Se encuentran en potencias desde los 5 hasta los 500 kilovoltio-amperios.
- Voltajes desde 2.4 hasta 34.5 kilovoltios.
- Diseñados para frecuencias de 60 o 50 hertz.
- Típicamente tienen refrigeración de baños de aceite.
- Van dispuestos en estructuras en lo alto de los postes, acompañados de accesorios como soportes, bujes de alta tensión, terminales de alta tensión, puesta a tierra del tanque, entre otros.
- Su peso y potencia están relacionados de manera proporcional, y van desde los 98 kilogramos para transformadores de 10 kilovoltio-amperios, hasta los 1300 kilogramos para transformadores de 500 kilovoltio-amperios.

2.4.3. Conductores empleados en redes de distribución

Las Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDOID) (1999), definen a los conductores como “Material, usualmente en forma de alambre, cable o barra, capaz de conducir una corriente eléctrica” (p. 4). Los conductores se emplean en redes de distribución para transportar la energía de la subestación hacia los centros de transformación ubicados en postes, esto en los circuitos primarios, pero también se usan conductores para llevar la energía del centro de transformación hacia el punto de conexión con el usuario, aunque son conductores con características diferentes a los usados en los circuitos primarios, por ser éstos usados a voltajes menores.

Los conductores están hechos normalmente de cobre o aluminio y el uso de uno o el otro va a depender de las circunstancias y disposiciones que se tengan, ya que cada uno presenta sus propias propiedades físicas y químicas, como maleabilidad, conductividad, resistividad, costo, densidad, peso, así como su comportamiento frente a aleaciones.

2.4.3.1. Conductores eléctricos

De acuerdo con Ramirez (2004), se puede disponer de diferentes tipos de conductores, pueden ser alambres, conductores trenzados, cables, barras, entre otros, que básicamente consisten en filamentos de metal laminado o extruido cuya longitud es muy grande en comparación con el eje mayor de su sección transversal.

2.4.4. Distorsión armónica

Las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (1999), definen este fenómeno como “la distorsión de la onda senoidal de corriente o de tensión eléctrica de frecuencia nominal, ocasionada por la presencia de señales eléctricas senoidales de frecuencias diferentes y múltiples de dicha frecuencia nominal” (p. 5), esta distorsión es generada por los usuarios y si no se controla llega a tener presencia en la red de distribución, provocando daños señalados más adelante. En Guatemala los valores de tolerancia admisibles se encuentran dentro de la normativa antes señalada.

De acuerdo con RTR Energía S.L. (2012), “Los armónicos tienen una frecuencia que es múltiplo (2, 3, 4, 5, ...n) de la frecuencia fundamental” (p. 44) (60 Hertz en la red nacional). El número “n” establece el rango de la componente

armónica. Por ejemplo, para una frecuencia fundamental de 60 Hertz, el armónico de rango 7 presentará una frecuencia de 420 Hertz.

2.5. Matriz de generación eléctrica

El parque de generación es la parte medular de cualquier sistema eléctrico, debido a que sin ella no es posible que se den las actividades de transmisión y distribución, la matriz de generación puede estar compuesta por diversas tecnologías, que están en función de las políticas establecidas por cada país, así como de la disponibilidad que se tenga de los recursos del medio ambiente, sociales, políticos y financieros. Las fuentes de energía se pueden clasificar dos grandes grupos de acuerdo con el recurso utilizado, siendo estos renovables y no renovables, la generación con recursos renovables proviene de fuentes inagotables, es decir los recursos se regeneran más rápido de lo que se consumen, la legislación guatemalteca define en este grupo la energía eólica, solar, hidráulica, biomasa y geotérmica. Y los recursos no renovables son los que provienen de fuentes que se dan en cantidades limitadas, dentro de este grupo se encuentran los combustibles fósiles, energía térmica (Gobierno de Colombia, 1999). Por lo que a continuación se listan y describen las principales tecnologías usadas en la generación de energía en Guatemala.

2.5.1. Principales fuentes de generación de energía eléctrica

A continuación, se describen las principales fuentes de energía utilizadas en la matriz de generación de energía de Guatemala, utilizando recursos renovables y no renovables.

2.5.1.1. Energía solar

La energía solar es producida por reacciones nucleares dentro del sol, que luego se transmiten en forma de fotones a través del espacio, estos fotones viajan por el espacio hasta llegar a la Tierra. La Tierra recibe una radiación promedio de 1.367 kilovatios por cada metro cuadrado, este valor depende de las condiciones geográficas donde se encuentre el metro cuadrado. Al ingresar a la Tierra los fotones son afectados por la atmósfera, afectando la cantidad y tipo de radiación que llega a la superficie (Gobierno de Colombia, 1999).

El proceso de transformar la energía solar en energía eléctrica es realizado fundamentalmente por tres tipos diferentes de tecnologías: energía solar fotovoltaica, donde la luz del sol se convierte directamente a través de celdas solares, conocidas como celdas fotovoltaicas; energía solar térmica, que como indica el Gobierno de Colombia (1999) “Basa su tecnología en la captación de la radiación por medio de elementos denominados colectores o concentradores, los cuales disminuyen las pérdidas de calor y aumentan la energía absorbida” (p. 15).

Con relación a la composición de la energía solar pasiva el Gobierno de Colombia (1999), afirma que son:

Elementos que se aprovechan en la construcción o adecuación de una vivienda con el fin de calentarla o refrescarla; estos elementos pueden ser muros o cubiertas que actúan como colectores solares, construidos con materiales acumuladores de calor, como el ladrillo, la piedra y la teja de barro (p. 17).

En el país debido a su posición geográfica, presenta valores significativos de radiación solar durante casi todo el año. Actualmente se encuentran operando dos plantas de generación solar en el país, aportando 80 megavatios al sistema eléctrico nacional (Administrador del Mercado Mayorista, 2019).

2.5.1.2. Energía eólica

En concordancia con el Gobierno de Colombia (1999), la energía eólica es “La que está presente en forma de energía cinética en las corrientes de aire o viento” (p. 18). La energía antigua, utilizada con anterioridad en molinos de trigo, y otros usos, lo de reciente aparición es su uso para generar energía eléctrica.

Además, señalan que “La energía eólica puede transformarse principalmente en energía eléctrica por medio de aerogeneradores, o en fuerza motriz empleando molinos de viento” (p. 22). Para el aprovechamiento de este recurso es necesario el estudio de las condiciones de viento del lugar, durante por lo menos 5 años, por lo que resulta una inversión que demora algunos años en rendir frutos. Los parques eólicos están conformados por varios aerogeneradores y se conectan para suministrar energía eléctrica a la red.

Guatemala presenta condiciones climatológicas favorables para hacer uso del viento y generar energía; actualmente hay una potencia instalada de 107.4 megavatios en el sistema eléctrico nacional, (Administrador del Mercado Mayorista, 2019).

2.5.1.3. Energía hidráulica

El Gobierno de Colombia (1999), indica que la energía hidráulica “Proviene del agua y se manifiesta como energía cinética en el caudal de las corrientes, y

como energía potencial en la altura de las caídas de los ríos” (p. 31), además de ser la principal fuente de generación a nivel mundial.

Con relación al proceso que se desarrolla en estas centrales señala que la energía se transforma a través de estas centrales, utilizando la energía portencial almacenada en el agua contenida en un embalse, de acuerdo a una diferencia de nivel, por lo que se transforma energía cinética en potencial, que pasa por una turbina que está acoplada a un generador, quien es el encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

Señala que las centrales hidráulicas se pueden clasificar de acuerdo con el rango de potencia en megavatios que generan en, grandes, superiores a 100 megavatios, medianas entre 10 y 100 megavatios, y pequeñas menores o iguales a 10 megavatios.

Guatemala debido a la cantidad de recurso hídrico posee una potencia instalada de 1,556.077 megavatios en el sistema eléctrico nacional, siendo el recurso renovable que más participación tiene en el sistema, (Administrador del Mercado Mayorista, 2019).

2.5.1.4. Energía de la biomasa

El Gobierno de Colombia (1999), señala que la biomasa hace referencia a “Cualquier material proveniente de organismos vivos, como vegetación, bosques, selvas, cultivos acuáticos, bosques naturales, residuos agrícolas, desechos animales y desechos urbanos e industriales de tipo orgánico que se utilizan para producir energía” (p. 25).

Además señala que en el proceso en el cual se transforma la energía que se encuentra presente en la biomasa

Se utilizan tecnologías que dependen de la cantidad y clase de biomasa disponible. Con los principales sistemas de transformación pueden obtenerse combustibles, energía eléctrica, fuerza motriz o energía térmica. Así mismo indica que la digestión anaerobia es el proceso de descomposición de residuos animales y vegetales que, sin aire, hace que se produzca gas y lodo. El gas resultante en este proceso se conoce como biogás y el lodo se usa como fertilizante orgánico (p. 26).

En el país la energía producida de la biomasa se da en los ingenios azucareros, Guatemala posee una potencia instalada de 1064.899 megavatios en el sistema eléctrico nacional (Administrador del Mercado Mayorista, 2019).

2.5.1.5. Energía geotérmica

El Gobierno de Colombia (1999) indica que la energía geotérmica “Proviene de la energía calórica de la tierra, energía que se encuentra bajo la corteza terrestre. Por cada 100 metros bajo la superficie de la Tierra, la temperatura aumenta tres grados centígrados” (p. 39).

Así mismo señala que “La extracción y transformación del agua caliente para generar energía eléctrica en superficie implica la aplicación de tecnología avanzada. Pero existe otra forma de aprovechar esta energía conocidos como usos directos” (p. 39). Para la generación de energía se tienen los siguientes tres ciclos: ciclo con unidades de contrapresión, ciclo con unidades de condensación y ciclo binario.

Guatemala posee una potencia instalada de 49.2 megavatios en el sistema eléctrico nacional con este tipo de tecnología, siendo un recurso poco aprovechado en el país, (Administrador del Mercado Mayorista, 2019).

2.5.1.6. Energía térmica

Por su parte, Bermudez (2009), señala que estas centrales consisten en:

Una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel-oil o gas en una caldera diseñada al efecto. El combustible se almacena en depósitos adyacentes, desde donde se suministra a la central, pasando a la caldera, en la que se provoca la combustión. Esta última genera el vapor a partir del agua que circula por una extensa red de tubos que tapizan las paredes de la caldera. El vapor hace girar los álabes de la turbina, cuyo eje rotor gira solidariamente con el de un generador que produce la energía eléctrica; esta energía se transporta mediante líneas de alta tensión a los centros de consumo. Por su parte, el vapor es enfriado en un condensador y convertido otra vez en agua, que vuelve a los tubos de la caldera, comenzando un nuevo ciclo. (p. 1)

Las diferencias más notables entre esta clase de centrales se encuentran en el tratamiento que se le da al combustible previo de ser introducido en la caldera y el diseño con el que se realicen los quemadores de esta.

Bermudez (2009), clasifica las centrales térmicas en clásicas o convencionales, y centrales no térmicas, dentro de las centrales convencionales se encuentran las que utilizan como materia prima el carbón, las que utilizan derivados del petróleo, y las centrales térmicas de gas natural. Dentro de las

centrales térmicas no convencionales se encuentran las centrales de ciclo combinado, que son:

La combinación de un ciclo de gas y un ciclo de vapor; y las centrales térmicas de combustión de lecho fluidizado, que consiste en quemar carbón en un lecho de partículas inertes, a través del cual se hace pasar una corriente de aire; y las centrales térmicas -gicc- gasificación de carbón integrada en ciclo combinado, la gasificación del carbón transforma el carbón sólido en un gas sintético compuesto principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno. (p. 3)

En Guatemala la energía producida por centrales térmicas se da a través de turbinas de gas y de vapor, y se posee una potencia instalada de 674.55 megavatios en el Sistema Eléctrico Nacional, (Administrador del Mercado Mayorista, 2019).

2.5.1.7. Motores de combustión interna

Son máquinas térmicas que producen energía mecánica en el eje a partir de la transformación de la energía química del combustible en un proceso de combustión dentro de la cámara de combustión. El procedimiento de combustión es la reacción química exotérmica de una sustancia llamada combustible, con un comburente que generalmente es el oxígeno del aire. Para que se desencadene la reacción es necesario que coexistan tres elementos: combustible (material que arde), comburente (material que hace arder) y un desencadenante (suministra la energía requerida para alcanzar la temperatura de inicio de la combustión). La combustión genera luminiscencia, calor y gases que dependen de la composición de los elementos que intervienen en la reacción. (Montaño, 2016, p. 24)

Actualmente en el sistema eléctrico nacional hay una potencia instalada de 570.158 megavatios con esta tecnología. (Administrador del Mercado Mayorista, 2019).

2.5.2. Descripción de la matriz de generación eléctrica del país

El Administrador del Mercado Mayorista (2019), indica que el sistema de generación de energía nacional está conformado por una capacidad instalada de 4072.741 MW, compuesto por diversas centrales como hidroeléctricas, generadores distribuidos renovables, térmicas, geotérmicas, solar fotovoltaica, y eólicas, que abastecen de energía al país, así como se comercializa con México y con el Mercado Eléctrico Regional. La matriz de generación eléctrica nacional es principalmente hidrotérmica, aunque es una matriz diversificada debido a las distintas centrales que la conforman, éstas dos son las que predominan. A continuación, se muestra la participación por tipo de tecnología que se encuentra dentro del sistema eléctrico nacional, de acuerdo con la información del Administrador del Mercado Mayorista las plantas con tecnología hidráulica aportan el 40.1 % de la potencia, mientras que las plantas térmicas aportan el 31.13 % de la potencia al sistema.

Tabla I. **Participación por tipo de tecnología**

Tecnología	Megavatios instalados	Megavatios efectivos	Porcentaje
Hidráulica	1556.08	1402.72	40.09 %
Generación distribuida renovable	124.23	114.06	3.26 %
Turbinas de vapor	501.70	470.78	13.45 %
Turbinas de gas	172.85	135.81	3.88 %
Motores reciprocantes	570.16	482.70	13.80 %
Ingenios azucareros	1064.90	667.22	19.07 %
Geotérmica	49.20	39.28	1.12 %
Fotovoltaica	80.00	80.00	2.29 %
Eólica	107.4	106.5	3.04 %
Total	4226.51	3499.07	100.00 %

Fuente: Administrado del Mercado Mayorista. (2019). *Programación de largo plazo versión definitiva mayo 2019 - abril 2020.*

La energía producida tuvo el siguiente comportamiento:

Tabla II. **Energía producida por tipo de tecnología**

Tecnología	Gigavatios aportados	Porcentaje
Hidráulica	1671.07	25.20 %
Turbinas de vapor	1707.99	25.76 %
Turbinas de gas	1.13	0.02 %
Motores reciprocantes	291.37	4.39 %
Ingenios azucareros	1919.04	28.94 %
Geotérmica	132.16	1.99 %
Fotovoltaica	117.61	1.77 %
Eólica	166.44	2.51 %
Importaciones	591.12	8.91 %
Desviaciones	33.17	0.50 %
Total	6631.10	100.00 %

Fuente: Administrado del Mercado Mayorista. (2019). *Programación de largo plazo versión definitiva mayo 2019 - abril 2020.*

Como se puede observar la tecnología predominante fue la aportada por los ingenios azucareros, debido a que una de las características fundamentales de la matriz de generación es la estacionalidad, siendo la época lluviosa predominada por energía proveniente de centrales hidráulicas, y en la época seca dominada por cogeneradores.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la investigación contempla el enfoque, alcance, diseño y unidad de análisis de este, donde se describe el proceso para obtener los resultados y la discusión de estos.

3.1. Enfoque

El trabajo posee un enfoque cuantitativo ya que se utilizó la recolección y análisis de los datos para afinar las preguntas de investigación, se utilizó la recolección de datos para la medición numérica y el análisis estadístico usando medidas de tendencia central, con el fin establecer pautas de comportamiento, con un diseño de investigación cerrado.

A nivel mundial la electromovilidad ha tenido un importante crecimiento en los últimos años, sin embargo, en Guatemala no ha tenido el auge que marcan las tendencias mundiales, con base en esto se recolectaron datos como el parque vehicular de la ciudad de Guatemala, características de la red de distribución de la ciudad, y de la matriz de generación de energía eléctrica del país.

Indaga desde una perspectiva innovadora y prepara el terreno para nuevos estudios, debido a que se evaluaron las condiciones de implementar un 25 % de carga vehicular compuesta por automóviles eléctricos, y se verá cómo afecta ésta a la matriz de generación y la red de distribución, complementándolo con un análisis de la identificación de las características de los centros de recarga, a través de herramientas estadísticas como las medidas de tendencia central.

3.2. Alcance

La investigación tuvo un alcance exploratorio por cumplir con las siguientes características:

- Investigó un problema poco estudiado, ya que en el país aún es escasa la implementación de electromovilidad, y se ha abordado muy poco por las instituciones que deberían favorecer su uso.
- Indagó desde una perspectiva innovadora, ya que el comportamiento de las condiciones de la red de distribución y matriz de generación son muy particulares y se determinó a través de la evaluación cómo se espera que se comporten con la implementación de electromovilidad.
- Identificó conceptos promisorios, puesto que el estudio ayuda a detectar una ruta en materia de energía eléctrica para que la electromovilidad pueda incrementar su presencia en el país, contemplando ubicación y características de los centros de recarga, e identificando si se debe mejorar la red de distribución y la matriz de generación para la implementación de la electromovilidad.
- Preparó el terreno para nuevos estudios, ya que se pueden realizar estudios de mercadeo, más análisis sobre el sistema nacional interconectado evaluado la red de transmisión, entre otros.

3.3. Diseño

La investigación posee un diseño no experimental, ya que no se manipularon deliberadamente las variables, se observaron los fenómenos en su

ambiente natural para posteriormente ser analizados. Además, es transversal, ya que se recolectaron los datos en un solo momento, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación en dicho momento. Utilizando métodos estadísticos descriptivos se cuantificó en qué medida se ve afectada la red de distribución y la matriz de generación con la implementación de automóviles eléctricos, también la cantidad de puntos necesarios de recarga para poder abastecer la demanda de estos automóviles.

Los métodos estadísticos usados fueron la media, mediana y moda basado en los parámetros de los automóviles que más se usan actualmente alrededor del mundo, es decir tomando las tendencias mundiales se evaluó con el supuesto que tendrían esas tendencias si se implementaran en la ciudad de Guatemala, con las condiciones actuales, esto bajo la premisa de que los automóviles eléctricos cubran el 25 % del total del parque automovilístico actual que asciende a 84,826 vehículos.

De acuerdo con el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 estima que para el año 2032 circularán 4,447 vehículos eléctricos, asimismo, estima que para el año 2021 circularían menos de 200 de estas unidades, no obstante, de acuerdo a información publicada en el sitio web del Ministerio de Energía y Minas en el año 2020 habían más de 250 unidades en el país. Por otro lado, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) proyecta en un escenario pesimista 215,000 vehículos eléctricos en el país para el año 2030, por lo que se toman estos 84,826 vehículos como un valor intermedio entre ambas proyecciones. Se evaluó bajo las condiciones actuales del sistema eléctrico nacional cómo se comportaría la red de distribución y la matriz de generación para abastecer la energía requerida por los automóviles eléctricos que se estima existan en el país dentro de 10 años.

Tabla III. **Técnicas de investigación utilizadas**

Objetivo	Técnica de investigación
Determinar el impacto en la red de distribución causado por la implementación de electromovilidad.	Se evaluó con análisis estadístico a través de medidas de tendencia central, de acuerdo con la cantidad de energía que es suministrada actualmente en la ciudad, cómo se ve afectada ésta por el aumento de demanda derivado de los automóviles eléctricos, analizando el incremento en el consumo en las curvas horarias de usuarios y la curva de demanda de la distribuidora.
Determinar el impacto en la matriz de generación causado por la implementación de electromovilidad.	Se evaluó con análisis estadístico a través de medidas de tendencia central, de acuerdo a la cantidad de energía promedio que necesitan los automóviles eléctricos y sus características de recarga, en qué medida se ve afectada la matriz de abastecimiento de energía eléctrica.
Identificar las características técnicas y operativas que deberían tener los centros de carga para electromovilidad.	Con análisis estadístico a través de medidas de tendencia central, con la cantidad de automóviles eléctricos supuestos que circularían por la ciudad, se determinó los aspectos técnicos que deben tener los centros de recarga para abastecer la demanda, incluyendo una propuesta de los puntos donde serían necesarios estar. Tomando en cuenta las variables de, automóviles eléctricos, infraestructura de recarga y el recorrido promedio de un automóvil en la ciudad.

Fuente: elaboración propia.

3.4. Unidades de análisis

La población en estudio es el parque vehicular de la ciudad de Guatemala, y el sistema eléctrico nacional, debido a que se evaluó proyectando un escenario que implica la posibilidad de que el 25 % del parque vehicular de la ciudad corresponda a automóviles eléctricos, analizando la red de distribución y la matriz de generación que abastecerá la energía necesaria.

3.4.1. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla IV. Variables en estudio

Variable	Descripción	Indicadores
Habitantes de la ciudad de Guatemala	Variable numérica, independiente, escala de medición de razón.	Única
Parque automovilístico de la ciudad de Guatemala	Variable numérica discreta, independiente, escala de medición nominal.	Vehículos, buses del transporte público urbano, motocicletas.
Automóviles eléctricos	Variable categórica, dependiente, escala de medición ordinal.	Consumo de energía, tipos, costos.
Características de la red de distribución	Variable numérica, dependiente, escala de medición nominal.	Cobertura, capacidad de suministro, componentes técnicos.
Composición de la matriz de generación	Variable numérica, dependiente, escala de medición ordinal.	Estado actual, comercialización, políticas energéticas.
Combustible	Variable numérica, independiente, escala de medición de razón.	Demanda, políticas de estado.
Recorrido de los automóviles	Variable numérica, dependiente, escala de medición de intervalo.	Distancias promedio, horarios.

Fuente: elaboración propia.

3.5. Fases del estudio

A continuación, se describe cada una de las etapas del desarrollo de la investigación, cada etapa está ligada a los objetivos de esta.

3.5.1. Fase 1. Revisión documental

Se realizó la recolección de la información relacionada con los automóviles eléctricos, tomando en cuenta la energía necesaria para su funcionamiento, así como la manera de abastecerse, y las tendencias mundiales respecto al uso de estos. Se recolectó la información sobre la forma en que se abastece la demanda,

tomando en cuenta la capacidad instalada y las transacciones que se hacen para abastecer el sistema nacional interconectado. De la base de datos de la Superintendencia de Administración Tributaria se recogió la información correspondiente al parque vehicular actual, con información de la Municipalidad de Guatemala se obtuvieron datos sobre el transporte público de la ciudad de Guatemala.

Tabla V. **Descripción de la fase 1**

Núm.	Acción	Descripción
1	Recopilar datos de automóviles	Se estableció la cantidad de automóviles, que se encuentran en la ciudad de Guatemala.
2	Cálculo de los vehículos	Se calculó la cantidad de vehículos correspondiente al 25 % del total.
3	Cálculo de los autobuses	Se calculó la cantidad de autobuses del transporte público urbano correspondiente al 25 % del total.
4	Cálculo de las motocicletas	Se calculó la cantidad de motocicletas correspondiente al 25 % del total.
5	Estimación de la proporción	De acuerdo con las tendencias globales, se determinó la cantidad a la que correspondería cada tipo de vehículo.
6	Red de Distribución	Se obtuvo la información correspondiente a las características de la red de distribución.
7	Matriz de Generación	Se obtuvo la información correspondiente a las características de la matriz de generación.
8	Infraestructura	Se analizaron las características de la ciudad de Guatemala.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos de automóviles en la ciudad de Guatemala**

Automóvil	Cantidad	25 % de la cantidad
Motocicletas	197,460	49,365
Vehículos	339,303	84,826
Autobuses	853	213

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la Municipalidad de Guatemala y Superintendencia de Administración Tributaria.

De acuerdo con el Plan Nacional de Energía 2017-2032, proyecta una tendencia incremental y estima que en el año 2,032 circulen 4,447 vehículos eléctricos, con base en esto se estima que 84,826 vehículos podrían circular en el año 2043.

Tabla VII. Proyección de vehículos eléctricos

Tipo	Uso mundial	Cantidad
Vehículos VEB	68 %	57,371
Vehículos PHEV	32 %	27,455
Total	100 %	84,826

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la International Energy Agency.

Tabla VIII. Red de distribución de la ciudad de Guatemala

Características de la red	
Centros de Transformación	15,872
kVAs instalados	1,166,703

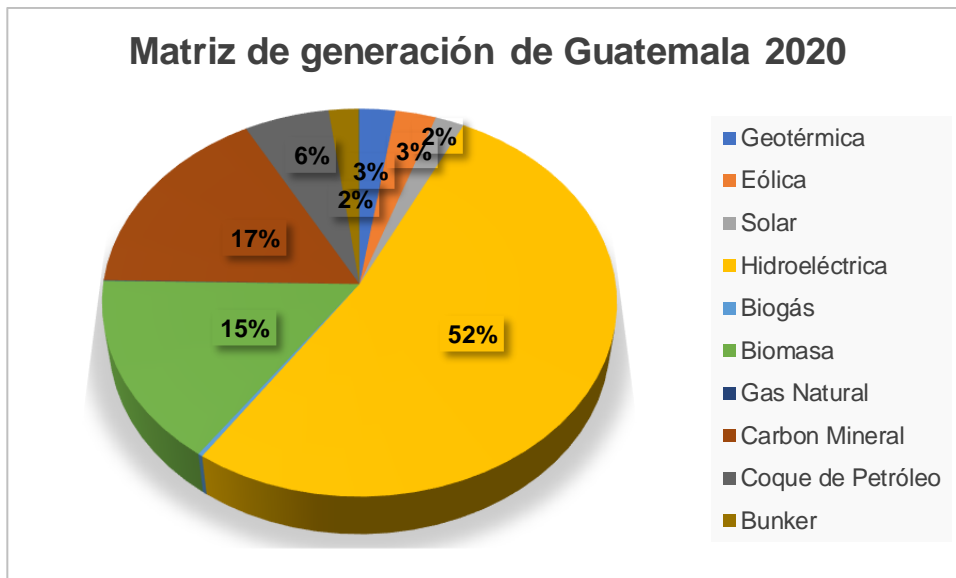
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

Tabla IX. **Matriz de generación de Guatemala 2020**

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH
GENERACIÓN POR TIPO DE RECURSO	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH	GWH
Geotérmica	23.78	22.08	23.59	22.81	23.07	22.61	23.26	23.36	22.78	23.39	21.40	21.74	273.86
Eólica	44.29	37.00	35.52	8.88	13.82	18.12	23.74	21.69	8.56	21.21	34.81	45.04	312.68
Solar	20.40	20.86	22.91	18.85	17.37	16.84	20.41	18.70	17.40	15.75	12.66	19.35	221.51
Hidroeléctrica	422.81	293.11	347.00	232.95	298.09	485.96	406.56	590.62	770.72	791.31	591.63	585.79	5,816.54
Biogás	2.27	2.14	2.49	2.23	2.60	2.61	2.59	2.72	2.70	2.80	2.37	2.46	29.97
Biomasa	320.50	322.40	330.95	292.66	43.95	0.28	0.34	0.12	0.36	0.48	114.29	291.63	1717.96
Gas Natural	0.01	0.00	0.28	0.22	0.32	0.08	0.74	1.37	0.73	0.95	0.51	0.48	5.70
Carbon Mineral	115.08	166.01	171.46	156.60	251.87	149.20	264.74	195.27	123.58	109.48	119.48	34.42	1857.20
Coque de Petróleo	53.79	65.83	76.79	91.93	105.93	77.03	74.13	39.43	0.00	28.45	38.13	0.00	651.43
Bunker	21.77	31.18	13.20	7.41	14.23	22.66	30.00	24.77	19.61	14.47	19.20	11.78	230.26
Diesel	0.02	0.07	0.02	0.33	0.53	0.83	0.22	0.22	0.13	0.54	2.00	0.05	4.96
TOTAL	1,024.72	960.67	1,024.20	834.88	771.78	796.20	846.74	918.26	966.56	1,008.82	956.49	1,012.74	11,122.06

Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. (2021). *Generación mensual por planta (XLS)*.

Figura 7. **Matriz de generación de Guatemala 2020**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Administrador del Mercado Mayorista.

Tabla X. **Características demográficas de la ciudad de Guatemala**

Información	Cantidad
Población	923,392
Viviendas particulares	283,756
Total de hogares	243,014
Promedio personas por hogar	3.8
Superficie (km ²)	220

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Instituto Nacional de Estadística.

3.5.2. Fase 2. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar el impacto en la red de distribución

Basado en la capacidad actual de la red de distribución de la ciudad de Guatemala, tomando en cuenta los centros de transformación instalados, y la capacidad de los mismos, se evaluaron los escenarios de recarga de los automóviles eléctricos mostrados en la sección de resultados, se tomó en cuenta la potencia necesaria y el tiempo que lleva realizar una recarga, con la premisa del 25 % del total de vehículos sean eléctricos, de igual forma con las motocicletas y los autobuses con las características técnicas de estos automóviles mostradas más adelante, con lo cual se logró determinar en qué medida se ve afectado el sistema de la red de distribución por los automóviles eléctricos, tomando en cuenta tres posibles escenarios de recarga (100 % de automóviles conectados, 50 % de automóviles conectados y 25 % de automóviles conectados a la red) todo esto con los datos obtenidos de la red y medidas de tendencia central para los datos proyectados. Para el análisis de la curva de carga de los usuarios se tomaron en cuenta a los que pertenecen a la tarifa Baja Tensión Simple (BTS) debido a que representan a más del 95 % de los usuarios de la distribuidora en la ciudad, con consumo promedio de 652.3 kWh-mes, de acuerdo con información de la CNEE.

Tabla XI. Descripción de la fase 2

Núm.	Acción	Descripción
1	Analizar curvas de carga	Análisis sobre los usuarios de la ciudad de Guatemala.
2	Determinar valor de energía	Incremento en la demanda por electromovilidad.
3	Añadir carga extra	Valores de la energía necesaria para electromovilidad.
4	Nueva curva de carga	Con la incorporación de electromovilidad se planteó la probable curva de carga.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Carga horaria normalizada de usuarios de EEGSA

Cargas horarias normalizadas EEGSA - (1/08/2018 A 31/07/2023)					
Hora	BTS	BTDP	A-BTDP	BTDFP	A-BTDFP
00:01 a 01:00	2%	3%	3%	2%	4%
01:01 a 02:00	2%	3%	5%	2%	4%
02:01 a 03:00	2%	3%	5%	2%	3%
03:01 a 04:00	2%	3%	5%	2%	3%
04:01 a 05:00	3%	4%	5%	2%	3%
05:01 a 06:00	3%	4%	5%	3%	4%
06:01 a 07:00	4%	4%	5%	3%	4%
07:01 a 08:00	4%	5%	4%	4%	4%
08:01 a 09:00	4%	5%	3%	5%	3%
09:01 a 10:00	5%	5%	3%	6%	3%
10:01 a 11:00	5%	5%	2%	6%	3%
11:01 a 12:00	5%	5%	2%	6%	3%
12:01 a 13:00	5%	5%	2%	6%	3%
13:01 a 14:00	5%	5%	3%	6%	4%
14:01 a 15:00	5%	5%	3%	6%	4%
15:01 a 16:00	5%	5%	4%	6%	5%
16:01 a 17:00	5%	5%	5%	5%	6%
17:01 a 18:00	5%	5%	5%	5%	7%
18:01 a 19:00	5%	4%	5%	4%	7%
19:01 a 20:00	6%	4%	5%	4%	6%
20:01 a 21:00	6%	4%	5%	4%	5%
21:01 a 22:00	5%	4%	5%	3%	4%
22:01 a 23:00	4%	3%	5%	3%	4%
23:01 a 00:00	3%	3%	5%	3%	4%

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2019). *Estudio de caracterización de la carga.*

Tabla XIII. **Características consideradas para las motocicletas eléctricas**

Automóvil	Características
Motocicleta	Capacidad (Ah)
	10
	Voltaje (V)
	240
	Energía (kWh)- por hora
	2.4
	Energía requerida (kWh)
4.8	

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Electromotos.

Tabla XIV. **Características consideradas para el vehículo BEV**

Vehículo BMW i3	
Vehículo VEB	Capacidad (Ah)
	120
	Voltaje (V)
	240
	Energía requerida 100 % de carga (kWh)
	42.2
	Potencia sistema eHome T1C32 (kW)
	7.4
	Horas de recarga completa
	5.70
	Consumo mixto kWh/100 km
	13.5
	Energía diaria residencial (kWh)
	42.18
Recorrido promedio diario (km)	
20	
Frecuencia de recarga (días)	
7	

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Autopista.

Tabla XV. **Características consideradas para vehículo PHEV**

Hyundai Ioniq PHEV	
Vehículo PHEV	Voltaje (V)
	240
	Energía requerida 100 % de carga (kWh)
	8.9
	Potencia de cargador a bordo (kW)
	3.3
	Horas de recarga completa
	2.7
	Autonomía eléctrica (km)
	66
	Recorrido promedio diario (km)
	20
Frecuencia de recarga (días)	
7	

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Diario Motor.

Tabla XVI. **Características técnicas de autobús BEV**

Autobús Irizar i2e	
Autobús BEV	Corriente máxima de entrada (A)
	152
	Voltaje (V)
	480
	Energía requerida 100 % de carga (kWh)
	376
	Potencia sistema (kW)
	72.96
	Horas de recarga completa
	5.15
	Autonomía eléctrica (km)
	220
	Recorrido promedio diario (km)
150	
Frecuencia de recarga (días)	
1.47	

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Irizar.

Las características de la red de distribución que abastece la ciudad de Guatemala contemplan 15,872 centros de transformación y la capacidad de 1,166,703 KVA instalados, los centros de transformación conforman el 28 % del total de la distribuidora y la capacidad instalada corresponde al 29 % de la que posee la misma.

3.5.3. Fase 3. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar el impacto en la matriz de generación de energía eléctrica

Tomando en cuenta la capacidad instalada de las distintas centrales de energía eléctrica conectadas al sistema nacional interconectado, la potencia efectiva que pueden brindar dichas centrales, y la energía y potencia demanda en la actualidad se procedió a determinar en qué medida aumentará con la implantación de la electromovilidad en la ciudad de Guatemala, tomando en cuenta tres escenarios de acuerdo a la hora en que se registre el aumento de demanda (punta, valle e intermedio), y si es posible el abastecimiento de esta energía por las centrales del país como se mostrará en la sección de resultados.

Tabla XVII. Descripción de la fase 3

Núm.	Acción	Descripción
1	Analizar demanda	Se analizó la demanda del último año, tomando en cuenta, máximos y mínimos, estacionalidad de la generación.
2	Incremento en demanda	A la energía demanda se le agregó la requerida por electromovilidad.
3	Análisis de la matriz de generación	Con base en los nuevos requerimientos de energía, se evaluó si se posee la capacidad de suministrarla, tomando en cuenta diferencias en las transacciones.
4	Curva de demanda SIN	Con base en análisis previos se planteó la nueva curva de demanda del SIN.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Generación y consumo de energía en el SNI 2019**

Resumen de producción de energía (GWh)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOT
+ Producción S. N. I.	999.2	861.8	1,056.4	1,033.4	1,049.8	1,006.2	967.9	1,036.0	1,011.7	1,119.7	1,072.6	1,013.6	12,228.2
+ Importación	78.0	111.8	102.0	105.7	104.2	89.4	118.1	91.5	92.9	65.4	46.4	62.2	1,067.6
+ Desviaciones	6.0	4.2	6.1	6.0	5.5	5.3	6.3	5.3	7.3	7.8	7.1	5.9	72.9
Total	1,083.2	977.9	1,164.5	1,145.0	1,159.6	1,100.9	1,092.2	1,132.8	1,111.9	1,192.9	1,126.1	1,081.7	13,368.8
Resumen de consumo de energía (GWh)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOT
- Consumo S. N. I.	875.1	828.7	925.5	878.9	938.3	889.6	920.3	924.9	888.3	918.2	886.4	888.7	10,762.9
- Exportación	169.3	109.8	194.7	222.8	176.5	171.2	129.5	163.6	180.3	231.0	199.7	153.6	2,101.9
- Desviaciones	7.9	7.7	7.7	6.6	7.9	6.6	6.8	6.7	8.1	7.0	7.0	8.2	88.1
- Pérdidas	30.9	31.8	36.5	36.8	36.9	33.5	35.6	37.6	35.2	36.8	33.0	31.2	415.9
Total	1,083.2	977.9	1,164.5	1,145.0	1,159.6	1,100.9	1,092.2	1,132.8	1,111.9	1,192.9	1,126.1	1,081.7	13,368.8
Consumo de energía (GWh) EEGSA													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOT
Empresa Eléctrica De Guatemala, S. A.	303.6	282.7	313.3	300.9	319.4	303.2	312.0	311.9	299.6	311.0	300.5	307.7	3,665.7

Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. (2020). *Informe estadístico 2019*.

3.5.4. Fase 4. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para Identificar las características de los centros de recarga

Con los recorridos promedio de los automóviles en la ciudad de Guatemala, que incluye el recorrido promedio de un vehículo, el de una motocicleta, y el de un autobús, se determinará la energía necesaria para que los automóviles eléctricos realicen estos recorridos, y la frecuencia con la que se debería recargar las baterías para el funcionamiento de estos, basado en eso, se procederá a establecer los puntos donde deberían estar los centros de recarga públicos y privados. Planteando con un mapa los puntos propuestos para los centros de recarga públicos.

Tabla XIX. **Descripción de la fase 4**

Núm.	Acción	Descripción
1	Posibles puntos	De acuerdo con las características técnicas de los automóviles se plantearon los posibles puntos donde se pueden colocar centros de recarga.
2	Instalación de infraestructura	De acuerdo con los tipos de recargas se analiza la posibilidad y viabilidad de instalarlos en la ciudad de Guatemala.
3	Nuevo mapa	Se coloca imágenes del mapa de la ciudad con la adhesión de los posibles puntos de recarga.

Fuente: elaboración propia.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación se vivió la emergencia sanitaria mundial derivado del covid-19, esta pandemia afectó el desarrollo de la investigación debido a que no se pudo recolectar la información como se había planeado, en tal sentido se debe mencionar que con la información solicitada a la Municipalidad de Guatemala a través de la unidad de información pública no fue otorgada en su totalidad, razón por la cual el análisis sobre la implementación de los puntos de recarga se vio afectada reduciendo el contenido de lo planeado, no obstante se adaptó la información brindada para poder cumplir parcialmente el objetivo planteado.

Así mismo, la falta de información afectó el cumplimiento de los otros objetivos específicos planteados, aunque en menor medida. A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada objetivo específico.

4.1. Evaluación de la red de distribución

Se consideraron 3 escenarios al momento de recargar los automóviles, un escenario crítico, que supone el 100 % de la carga de electromovilidad conectada al mismo tiempo, un escenario intermedio, que supone el 50 % de la carga de electromovilidad conectada, y un tercer escenario, leve, que supone el 25 % de la carga conectada. Lo anterior considerando únicamente motocicletas y vehículos, ya que se consideró que los autobuses no se recargarán en residencias.

Tabla XX. Escenarios considerados para carga residencial

Escenarios considerados			
Automóvil	Crítico (100 %)	Intermedio (50 %)	Leve (50 %)
Motocicletas cargadas simultáneamente (kW)	118,476.00	59,238.00	29,619.00
VEB cargados simultáneamente (kW)	424,545.40	212,272.70	106,136.35
PHEV cargados simultáneamente (kW)	90,601.50	45,300.75	22,650.38
Demanda total (kW)	633,622.90	316,811.45	158,405.73

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se analizó la demanda de energía para la distribuidora, tomando los datos del mes de noviembre 2019, y se obtuvieron los siguientes valores de promedio de demanda de energía horaria.

Tabla XXI. Demanda horaria promedio de la distribuidora

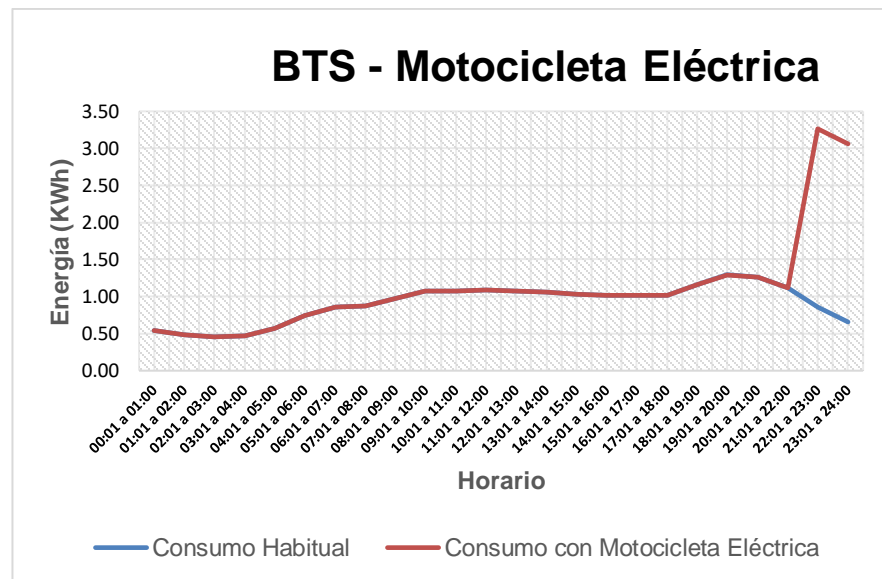
Hora	Demanda horaria promedio (kWh)	Desviación estándar	Coficiente de Variación
00:01 a 01:00	284,292.64	7,928.56	3 %
01:01 a 02:00	265,719.92	6,718.14	3 %
02:01 a 03:00	258,550.09	6,353.36	2 %
03:01 a 04:00	261,321.99	5,484.37	2 %
04:01 a 05:00	290,545.40	4,935.26	2 %
05:01 a 06:00	347,130.07	6,411.28	2 %
06:01 a 07:00	383,108.08	6,715.14	2 %
07:01 a 08:00	430,563.03	6,658.79	2 %
08:01 a 09:00	469,898.76	6,447.86	1 %
09:01 a 10:00	494,419.81	7,002.13	1 %
10:01 a 11:00	509,075.64	7,456.45	1 %
11:01 a 12:00	521,282.99	7,858.47	2 %
12:01 a 13:00	519,013.41	7,391.97	1 %
13:01 a 14:00	509,149.83	6,661.39	1 %
14:01 a 15:00	504,704.04	7,017.50	1 %
15:01 a 16:00	498,555.74	7,720.53	2 %
16:01 a 17:00	484,590.97	7,977.27	2 %
17:01 a 18:00	509,907.65	7,591.74	1 %
18:01 a 19:00	578,030.52	6,245.06	1 %
19:01 a 20:00	562,975.59	5,882.13	1 %
20:01 a 21:00	531,305.53	5,527.99	1 %
21:01 a 22:00	479,963.05	5,236.88	1 %
22:01 a 23:00	401,837.92	7,183.91	2 %
23:01 a 00:00	331,494.61	7,875.43	2 %

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del AMM.

A continuación, se analizan las curvas de carga normalizadas para usuarios de Empresa Eléctrica de Guatemala, tomando en cuenta usuarios de la tarifa BTS analizando el comportamiento de la curva para la implementación de vehículos y motocicletas respectivamente, tomando en cuenta el escenario en que los automóviles son cargados en las residencias a partir de las 22:00 horas.

- Evaluación del comportamiento de la curva BTS con implementación de motocicletas eléctricas

Figura 8. **Comportamiento de la curva de carga BTS con implementación de motocicleta eléctrica**

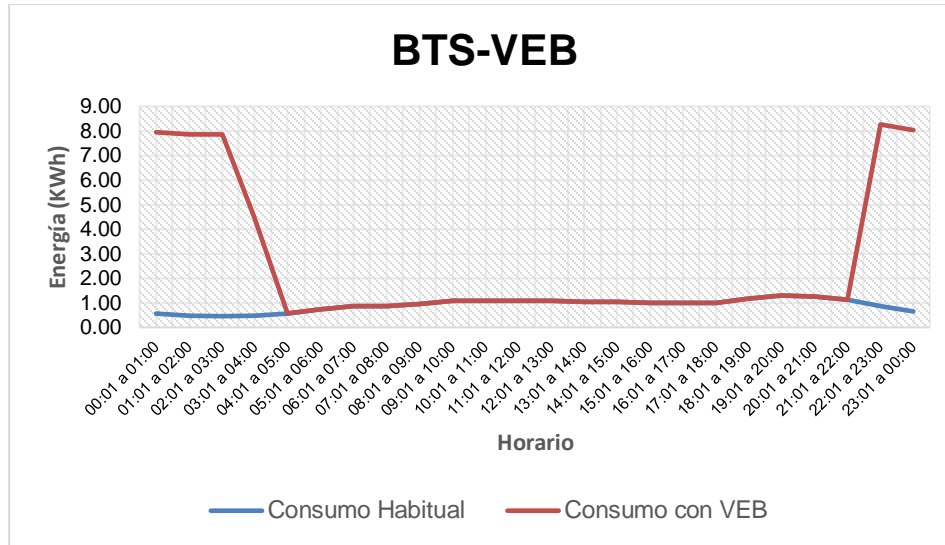


Fuente: elaboración propia.

Incremento mensual en consumo = 96 kWh

- Evaluación del comportamiento de la curva BTS con implementación de vehículo eléctrico puro, y recargas residenciales de 2 veces por semana.

Figura 9. **Comportamiento de la curva de carga BTS con implementación de vehículo eléctrico puro**

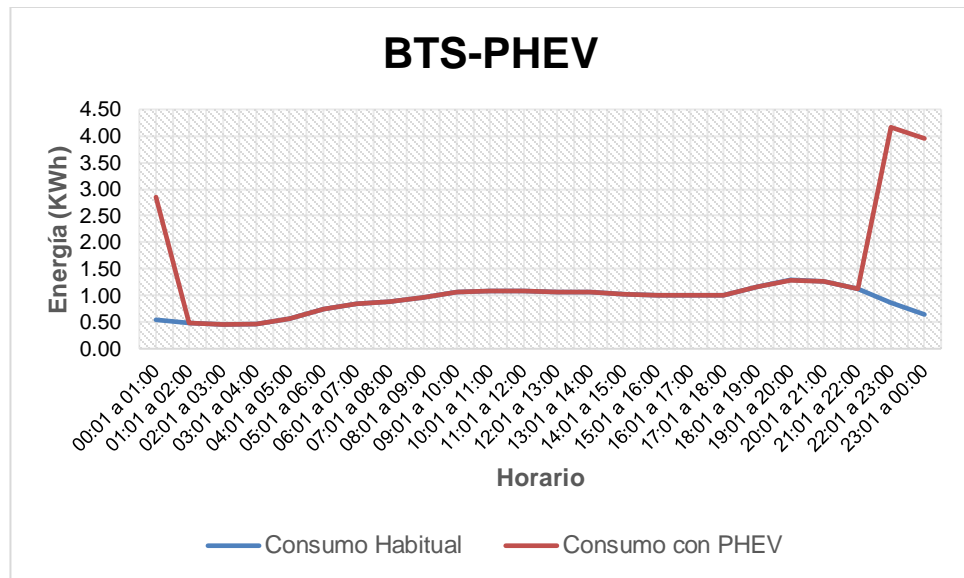


Fuente: elaboración propia.

Incremento mensual en consumo = 168.72 kWh

- Evaluación del comportamiento de la curva BTS con implementación de vehículo eléctrico híbrido enchufable, y recargas residenciales de 1 vez por semana.

Figura 10. Comportamiento de la curva de carga BTS con implementación de vehículo eléctrico híbrido enchufable

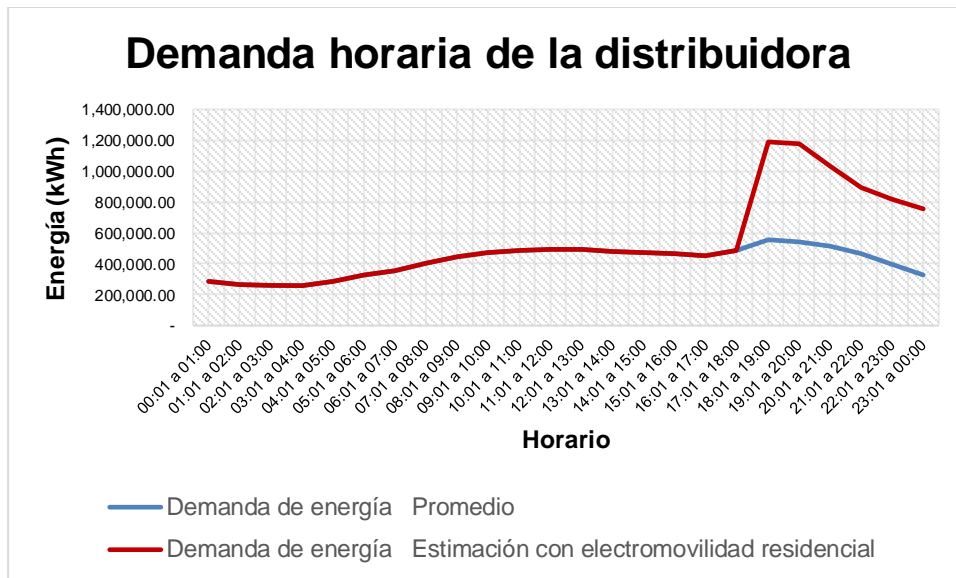


Fuente: elaboración propia.

Incremento mensual en consumo = 35.6 kWh

- De acuerdo con los escenarios planteados, se asume el escenario crítico y se obtiene un incremento en la demanda de 633,622.9 kW debido a la implementación de electromovilidad impactando directamente en la red de distribución, tomando en cuenta el escenario donde se conecta en horario de banda punta.

Figura 11. **Implementación de la electromovilidad en la demanda de la distribuidora en banda punta**



Fuente: elaboración propia.

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 3,056,028.90 kWh para un día.

4.2. Evaluación de la matriz de generación

Se consideraron 3 escenarios al momento de realizar de todos los elementos de electromovilidad considerados (motocicletas, vehículos y autobuses), un escenario crítico, que supone el 100 % de la carga de electromovilidad conectada al mismo tiempo, un escenario intermedio, que supone el 50 % de la carga de electromovilidad conectada, y un tercer escenario, leve, que supone el 25 % de la carga conectada.

Tabla XXII. Escenarios considerados para incremento de la demanda a ser abastecida

Escenarios considerados			
Dispositivo	Crítico (100 %)	Intermedio (50 %)	Leve (25 %)
Motocicletas cargadas simultáneamente (kW)	118,476.00	59,238.00	29,619.00
VEB cargados simultáneamente (kW)	424,545.40	212,272.70	106,136.35
PHEV cargados simultáneamente (kW)	90,601.50	45,300.75	22,650.38
Autobuses cargados simultáneamente (kW)	15,540.48	7,770.24	3,885.12
Demanda total (kW)	649,163.38	324,581.69	162,290.85

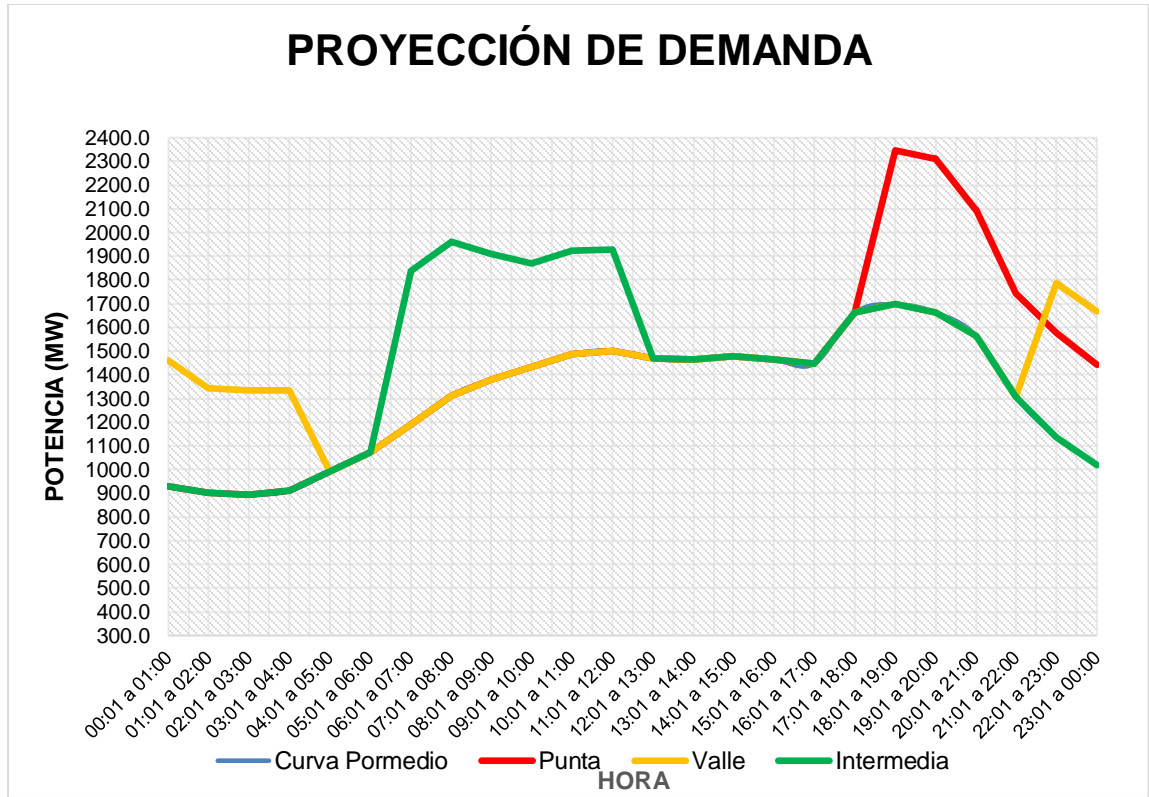
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Proyección de demanda crítica a ser abastecida en el SIN

Hora	Demanda promedio (MW)	Desviación estándar	Coefficiente de Variación	Escenario crítico en banda punta	Escenario crítico en banda valle	Escenario crítico en banda intermedia
00:01 a 01:00	928.7	56.5	6 %	928.7	1,459.4	928.7
01:01 a 02:00	903.8	51.0	6 %	903.8	1,343.9	903.8
02:01 a 03:00	893.8	50.5	6 %	893.8	1,333.9	893.8
03:01 a 04:00	910.6	41.0	5 %	910.6	1,335.1	910.6
04:01 a 05:00	991.1	52.3	5 %	991.1	991.1	991.1
05:01 a 06:00	1072.6	55.3	5 %	1,072.6	1,072.6	1,072.6
06:01 a 07:00	1189.0	38.8	3 %	1,189.0	1,189.0	1,838.1
07:01 a 08:00	1311.9	45.5	3 %	1,311.9	1,311.9	1,961.1
08:01 a 09:00	1380.9	36.0	3 %	1,380.9	1,380.9	1,911.6
09:01 a 10:00	1431.8	38.9	3 %	1,431.8	1,431.8	1,871.9
10:01 a 11:00	1485.1	33.8	2 %	1,485.1	1,485.1	1,925.2
11:01 a 12:00	1502.7	32.6	2 %	1,502.7	1,502.7	1,927.2
12:01 a 13:00	1467.6	32.1	2 %	1,467.6	1,467.6	1,467.6
13:01 a 14:00	1462.5	35.7	2 %	1,462.5	1,462.5	1,462.5
14:01 a 15:00	1479.4	37.2	3 %	1,479.4	1,479.4	1,479.4
15:01 a 16:00	1464.2	35.6	2 %	1,464.2	1,464.2	1,464.2
16:01 a 17:00	1446.7	37.4	3 %	1,446.7	1,446.7	1,446.7
17:01 a 18:00	1661.3	26.4	2 %	1,661.3	1,661.3	1,661.3
18:01 a 19:00	1697.2	29.1	2 %	2,346.4	1,697.2	1,697.2
19:01 a 20:00	1662.7	30.7	2 %	2,311.9	1,662.7	1,662.7
20:01 a 21:00	1564.6	31.5	2 %	2,095.3	1,564.6	1,564.6
21:01 a 22:00	1305.0	59.2	5 %	1,745.0	1,305.0	1,305.0
22:01 a 23:00	1137.3	50.5	4 %	1,577.4	1,786.5	1,137.3
23:01 a 00:00	1018.3	24.8	2 %	1,442.8	1,667.5	1,018.3

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del AMM.

Figura 12. **Proyección de demanda horaria a ser abastecida en el SIN en escenario crítico**



Fuente: elaboración propia.

Se estima un incremento en la demanda de energía mensual de 16.6 GWh derivado de la implementación de electromovilidad.

Tabla XXIV. **Producción, consumo de energía 2019 y proyección de consumo de energía implementando electromovilidad**

Resumen de producción de energía (GWh)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
+ PRODUCCIÓN S. N. I.	999.2	861.8	1,056.4	1,033.4	1,049.8	1,006.2	967.9	1,036.0	1,011.7	1,119.7	1,072.6	1,013.6	12,228.2
+ IMPORTACIÓN	78.0	111.8	102.0	105.7	104.2	89.4	118.1	91.5	92.9	65.4	46.4	62.2	1,067.6
+ DESVIACIONES*	6.0	4.2	6.1	6.0	5.5	5.3	6.3	5.3	7.3	7.8	7.1	5.9	72.9
TOTAL	1,083.2	977.9	1,164.5	1,145.0	1,159.6	1,100.9	1,092.2	1,132.8	1,111.9	1,192.9	1,126.1	1,081.7	13,368.8
Resumen de consumo de energía (GWh)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
- CONSUMO S. N. I.	875.1	828.7	925.5	878.9	938.3	889.6	920.3	924.9	888.3	918.2	886.4	888.7	10,762.9
- EXPORTACIÓN	169.3	109.8	194.7	222.8	176.5	171.2	129.5	163.6	180.3	231.0	199.7	153.6	2,101.9
- DESVIACIONES ***	7.9	7.7	7.7	6.6	7.9	6.6	6.8	6.7	8.1	7.0	7.0	8.2	88.1
- PÉRDIDAS	30.9	31.8	36.5	36.8	36.9	33.5	35.6	37.6	35.2	36.8	33.0	31.2	415.9
TOTAL	1,083.2	977.9	1,164.5	1,145.0	1,159.6	1,100.9	1,092.2	1,132.8	1,111.9	1,192.9	1,126.1	1,081.7	13,368.8
Consumo de energía estimado con implementación de electromovilidad (GWh)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
- CONSUMO S. N. I.	1,099.8	994.5	1,181.0	1,161.6	1,176.2	1,117.5	1,108.8	1,149.4	1,128.5	1,209.5	1,142.7	1,098.3	13,567.9

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del AMM.

4.3. Puntos de recarga

El estudio plantea la posibilidad de que todos los hogares de la ciudad puedan ser un punto de recarga. Razón por la cual se determina que en la ciudad de Guatemala habría 243,043 centros de recarga lenta y semi rápida.

Así mismo, se plantea la posibilidad de centros comerciales, parqueos puedan implementar la infraestructura de recarga semi rápida, lo cual sumaría un aproximado en parqueos de 178 puntos de recarga y más de 150 en centros comerciales. A continuación, se muestran las imágenes de las sugerencias de estos puntos.

Figura 13. Centros comerciales de ciudad de Guatemala



Fuente: Google Maps. (2019). Consulta: noviembre 2019. Recuperado de <https://www.google.com/maps/?hl=es>

Así mismo, se hace la propuesta de puntos de recarga rápida, de acuerdo con lo siguiente: un centro de recarga por zona, y 3 en las zonas con lo cual sumaría al menos 22 centros de recarga rápidos.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se detalla el análisis sobre los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos planteados.

5.1. Evaluación de la red de distribución

En los resultados obtenidos en la evaluación de la red de distribución a través del análisis sobre las curvas de carga, se determinó el impacto que tendría la implementación de motocicletas y automóviles eléctricos en el consumo y distribución de este para usuarios de la tarifa Baja Tensión Simple, en lo cual se obtuvieron curvas donde es notorio el cambio en el comportamiento de la demanda.

Para la evaluación del impacto de las motocicletas eléctricas, se determinó que un usuario que posea una motocicleta eléctrica y tenga preferencia por recargar el dispositivo en su hogar, vería un incremento de 96 kWh en su factura de energía eléctrica, considerando 20 recargas mensuales, con un incremento de hasta 2.4 kW en la potencia de la demanda horaria.

Asimismo, se evaluó el impacto de la implementación de vehículos eléctricos en el consumo y demanda de los usuarios de la tarifa BTS, con lo que se obtuvo el análisis de la curva de demanda horaria, en tal sentido se determinó que un usuario que posea un vehículo eléctrico puro y tenga preferencia por recargar el dispositivo en su hogar vería un incremento de 168.72 kWh en su factura de energía eléctrica, con un incremento de hasta 7.4 kW en la potencia de la demanda horaria.

Además, se evaluó el impacto de la implementación de vehículos eléctricos híbridos enchufables en el consumo y demanda de los usuarios de la tarifa BTS, con lo que se obtuvo el análisis de la curva de demanda horaria, en tal sentido se determinó que un usuario que posea un vehículo eléctrico híbrido enchufable, y tenga preferencia por recargar el dispositivo en su hogar vería un incremento de 35.6 kWh en su factura de energía eléctrica, con un incremento de hasta 3.3 kW en la potencia de la demanda horaria.

Derivado de las tres evaluaciones anteriores es importante que los usuarios residenciales consideren los incrementos en la demanda de potencia, ya que los usuarios de la tarifa BTS al sobrepasar los 11kW tendrían un incremento considerable en su factura de energía, por lo que los usuarios deben tener en cuenta el horario que mejor les convenga para cargar su automóvil, o bien considerar un cambio a una tarifa más adecuada como la Baja Tensión Simple Horaria, que se adapte mejor a sus necesidades.

Como resultado de un análisis sobre un escenario crítico donde se plantea la posibilidad de que todos los usuarios de motocicletas y vehículos eléctricos plantados en la investigación decidieran conectar sus dispositivos para recargarlos de manera simultánea, lo cual dio como resultado un incremento de hasta 633,622.9 kW en la demanda. Este escenario se considera el más importante ya que los sistemas eléctricos se diseñan esperando el más crítico de los escenarios, así mismo un consumo de energía de 3,056,028.90 kWh para este escenario crítico, lo cual representa un incremento considerable en la demanda de la distribuidora.

Lo anterior se hizo con los datos promedio sobre la demanda horaria de la EEGSA, de los valores del mes de noviembre 2019, usando únicamente los días hábiles (lunes a viernes), consiguiendo valores de desviación estándar bajos, y

coeficientes de varianza de un máximo de 3 % como se mostró en la sección de resultados.

Figura 14. **Desviación estándar de la demanda horaria**



Fuente: elaboración propia.

Para que la implementación de la cantidad de motocicletas y vehículos eléctricos planteadas debe existir una red de distribución capaz de soportar dicho aumento en la demanda, a nivel técnico con transformadores, conductores, y demás equipo que conforma la red eléctrica de distribución. A grandes rasgos se puede afirmar que la capacidad instalada de los centros de transformación puede soportar la demanda planteada en la investigación, no obstante, se debe estudiar a detalle la capacidad instalada por área, realizar más estudios técnicos como flujos de carga que logren determinar el comportamiento de la red de distribución. Se debe señalar que a nivel técnico la calidad del suministro en la red de distribución es bueno, en cuanto los indicadores que establece el marco regulatorio, con lo cual ya tiene una premisa importante para que los usuarios puedan recargar los automóviles en sus hogares haciendo uso de la red de distribución.

5.2. Evaluación de la matriz de generación

Sobre la evaluación de la matriz de generación se evaluó tomando en cuenta el escenario más crítico, que es un aumento en la demanda donde todos las motocicletas, vehículos y autobuses eléctricos se conecten simultáneamente, lo cual provocaría un incremento en la demanda de hasta 649,163.38 kW. Adicionalmente para la cantidad de vehículos estimada se obtuvo un requerimiento mensual de energía de 16.6 GWh.

Lo anterior se determinó con los valores promedio de la demanda horaria del SNI, usando únicamente los días hábiles (lunes a viernes), consiguiendo valores de desviación estándar bajos, y coeficientes de varianza de un máximo de 6 % como se mostró en la sección de resultados.

Figura 15. **Desviación estándar de la demanda horaria del SNI**



Fuente: elaboración propia.

Al analizar la demanda en el escenario crítico de toda la carga conectada simultáneamente, se evaluó el comportamiento en cada una de las bandas de la curva de demanda del SNI (valle, intermedia y punta), obteniendo como resultado que el incremento de demanda durante la banda valle (de 22:00 a 06:00 horas) es el que menos requerimiento en el aumento de potencia demuestra, y hace que la curva horaria se asemeja más a una recta, lo cual trae múltiples beneficios al sistema eléctrico nacional, como aumento de la eficiencia y eficacia, logrando un achatamiento de los picos.

En tal sentido, la investigación abre la puerta para que se puedan realizar estudios técnicos, para determinar el comportamiento del sistema eléctrico nacional considerando el aumento en la demanda planteado.

Ante los planteamientos anteriores, se considera la matriz energética actual donde las centrales hidroeléctricas y de carbón son las que más energía aportan a la matriz, se determinó si la capacidad instalada actual podría abastecer la demanda planteada, tomando en cuenta un incremento en el consumo mensual de 16.6 GWh. Evaluando el comportamiento de la matriz energética del 2019 se determinó que sí es capaz de abastecer la demanda planteada, típicamente la exportación supera la importación de energía, por lo que a nivel SIN se puede afirmar que se está en la capacidad de poder abastecer la demanda.

La implementación de electromovilidad y su capacidad de abastecerse con el sistema nacional implica que la distribuidora compre más energía en el mercado a término, así como un aumento en su demanda firme contratada.

5.3. Puntos de recarga

Por otro lado, la investigación abordó los centros de recarga para la implementación de electromovilidad, se planteó desde el punto de vista donde todos los hogares de la ciudad sean un centro de recarga, teniendo un total de 283,756 posibles centros de recarga, ya que los automóviles eléctricos pueden conectarse directamente a un tomacorriente de 120 V o 240 V.

La investigación también plantea que los usuarios de vehículos eléctricos puros instalen puntos de recarga en sus parqueos, se plantea como posibilidad que se instalen los centros de recarga con conector eHome T1C32, con potencia de 7.4 kW, sin embargo, la gama de posibilidades es muy amplia, por lo cual los usuarios podrán instalar el de mejor conveniencia, ya que el sistema eléctrico en baja tensión permite instalarlos sin complicaciones.

En cuanto a los centros de recarga para autobuses se plantea que sea en los parqueos de estos donde se instalen los mismos, con una potencia de 72.96 kW por cada centro de recarga, se necesita de una instalación lo suficiente robusta y capaz de atender los 2013 autobuses eléctricos que se plantearon en la investigación.

Así mismo se propone la posibilidad de que exista al menos un centro de recarga rápida por zona en la ciudad de Guatemala, siendo 22 zonas como se muestra en los anexos, deberían existir al menos 22 de estos, actualmente no existe una fórmula que diga qué cantidad de centros de recarga debe existir por número de automóviles eléctricos, sin embargo dadas las características de la ciudad, se plantea esta posibilidad como mínimo, aunque se debe considerar las condiciones socioeconómicas de cada área, y la cantidad de habitantes de cada

área, con lo cual se podrá considerar implementar más centros de recarga en zonas comerciales en zonas como 1, 4, 9, 10, 13, 14, 15 y 16.

Derivado de los resultados obtenidos con la implementación de electromovilidad en la ciudad de Guatemala, a nivel SNI evaluando la red de distribución y matriz de generación existen condiciones aceptables para que se desarrolle plenamente, así mismo en cuanto a puntos de recarga, ya que todo hogar tiene la capacidad técnica de ser un punto de recarga.

CONCLUSIONES

1. En la ciudad de Guatemala existen las condiciones en cuanto a capacidad del sistema eléctrico para implementar electromovilidad, en tal sentido se podría implementar un 25 % del parque automovilístico de la ciudad, contando con motocicletas eléctricas, vehículos eléctricos puros, vehículos eléctricos híbridos, así como autobuses eléctricos.
2. El impacto de la implementación de electromovilidad bajo las premisas de la investigación, ocasionaría un incremento significativo en consumo mensual de energía de los usuarios de la tarifa BTS, alrededor de 96 kWh para usuarios con motocicletas eléctricas, 169 kWh para usuarios con vehículos eléctricos puros y 36 kWh para usuarios con vehículos eléctricos híbridos enchufables.
3. En el escenario evaluado en el cual el 100 % de los vehículos y motocicletas se conectan simultáneamente a la red de distribución, se estima un aumento en la demanda de energía de 3.06 GWh para un día, y hasta 15.4 GWh mensuales.
4. El impacto de la implementación de electromovilidad bajo las premisas de la investigación, ocasionaría un incremento de hasta 16.6 GWh en el consumo de energía mensual, con lo cual la capacidad instalada actual sí tiene puede aportar dicha energía. En cuanto al incremento de la demanda horaria la evaluación por banda refleja que en la banda valle se daría un aplanamiento de la curva horaria lo cual traería beneficios al SNI.

5. En la ciudad de Guatemala para la implementación de electromovilidad, se plantea que cada hogar pueda ser un centro de recarga, lenta o semirápida, con lo cual hay posibilidad para 243,043 puntos, además de parqueos y centros comerciales, lo cual sumaría más 300 puntos de recarga semirápida, así mismo se plantea la posibilidad de al menos un centro de recarga rápido por cada de la ciudad.

RECOMENDACIONES

1. Promover el uso de automóviles eléctricos a través de la Asociación de Empresas de Autobuses Urbanos, buscar mecanismos que les permitan optar a formas de transporte eléctrico, y a la Asociación de Importadores y Distribuidores de Vehículos Automotores.
2. Legislar en favor de la implementación de la electromovilidad, de tal manera que los usuarios puedan percibir beneficios económicos, que en consecuencia favorecerán la disminución de gases contaminantes en el ambiente, esto mediante el Congreso de la República de Guatemala.
3. Que Empresa Eléctrica de Guatemala S.A., realice estudios eléctricos como flujos de cargas o cortocircuitos, basado en el planteamiento del escenario analizado en la investigación, para que la red de distribución tenga la capacidad de soportar el aumento de demanda proyectado, y la electromovilidad no tenga inconvenientes en su implementación.
4. Realizar estudios eléctricos por medio del Administrador del Mercado Mayorista, que permitan preparar el SNI de tal manera que un aumento en la demanda derivado de los automóviles eléctricos no afecte al sistema.
5. Generar planes y políticas bien estructurados mediante el Ministerio de Energía y Minas, donde las alianzas público-privadas permitan que la electromovilidad se desarrolle plenamente en todo el territorio nacional.

6. Realizar más investigaciones en materia de electromovilidad, y así se pueda tener más información que coadyuve a su plena implementación en Guatemala, a través de los estudiantes de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

7. Que los usuarios interesados en utilizar vehículos eléctricos y recargarlos en su hogar, tomen en cuenta la potencia requerida para dichas recargas ya que podrían sobrepasar los 11kW límites que tiene la tarifa BTS, y en consecuencia incrementar de sobremanera su factura de energía eléctrica.

REFERENCIAS

1. ABB Group. (2005). *Transformadores de distribución y potencia*. Colombia: industria y comercio Recuperado de <http://www.interelectricas.com.com>
2. Administrador del Mercado Mayorista. (2019). *Programación de largo plazo versión definitiva mayo 2019 - abril 2020*. Recuperado de <https://www.amm.org.gt/>.
3. Aller, J. (2004). *Máquinas eléctricas rotativas, introducción a la teoría general*. Colombia: equinoccio.
4. Anaya, F. (2018). *Vehículos eléctricos en Guatemala, análisis de impacto y propuesta de implementación*. Quito, Ecuador: Organización Latinoamericana de Energía.
5. Artega, L., Delgado, C., y Pantoja, M. (2014). Diseño y construcción de una motocicleta eléctrica: una alternativa para el transporte sostenible. *El Hombre y la Máquina*, 1(45), 88-97.
6. Barros, H., y Ortega, L. (2018). *Análisis y diseño de la instalación eléctrica de una electrolinera en la ciudad de Cuenca* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador.
7. Bermudez, G. (2009). *Guía No. 2, Centrales térmicas con turbinas de vapor*. Colombia. Recuperado de <https://unefm.fundacioncsf.org/>

8. Bohórquez, J., Díez, I., López, C., y Díez, A. (julio-diciembre, 2011). Análisis de la regulación para la comercialización de energía para los vehículos eléctricos. *Investigaciones Aplicadas*, 5(2), 1-7. Recuperado de <http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/articloe/view/909>
9. C40 Cities Finance Facility . (2018). *Análisis de tecnologías alternas para buses*. México: Autor.
10. Castaño, N., y Franco, C. (septiembre 2011). Formulación de políticas para la penetración de las Smart Grid en Colombia. 9° *Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. Encuentro llevado a cabo en Bogotá, Colombia.
11. Cecati, C., Morkryani, G., Pícolo, A., y Siano, P. (noviembre 2010). An overview on the smart grid concept. *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 3322-3327. Conferencia llevada a cabo en Glendale, Estados Unidos.
12. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1999). *Resolución CNEE 09-99. Normas técnicas del servicio de distribución*. Guatemala: Autor.
13. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1999). *Resolución CNEE-47-99. Normas técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución*. Guatemala: Autor.

14. Congreso de la República. *Decreto No. 93-96. Ley general de electricidad.* de Guatemala. Autor.
15. De la Herrán, J. (2014). *El auto eléctrico, una solución apremiante. Ciencia de boleto.* México: Divulgación de la ciencia UNAM. Recuperado de http://www.dgdc.unam.mx/assets/cienciaboleto/cb_auto_electrico.pdf
16. Edgart, B., Murgovski, N., Pourabdollah, M., y Johannesson, L. (abril de 2014). Electromobility studies based on convex optimization: design and control issues regarding vehicle electrification. *IEEE Control Systems Magazine*, 34(2), 32-49. doi:10.1109/MCS.2013.2295709
17. Farhangi, H. (noviembre 2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 18-28. doi:10.1109/MPE.2009.934876
18. Fraile, J. (2003). *Máquinas eléctricas.* Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España.
19. García, M. (2015). *Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
20. Giraldo, G. (2015). *Estudio del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución de energía eléctrica* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
21. Gobierno de Chile. (2018). *Buenas prácticas en movilidad eléctrica.* (M. de Energía, Ed.) Santiago de Chile: Autor.

22. Gobierno de Colombia. (1999). *Energías renovables: descripción tecnologías y usos finales*. Colombia: Autor. Recuperado de <https://www1.upme.gov.co/>.
23. Gómez, J., Hernán, C., Kaul, V., y Isla, L. (2016). *La incorporación de los vehículos eléctricos en América Latina*. Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo.
24. Hinestroza, L. (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 posgrado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
25. Hoarau, Q., y Perez, Y. (septiembre 2019). Network tariff design with prosumers and electromobility: Who wins, who loses? *ELSERVIER*(83), 26-39.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.05.009>
26. Iberdrola. (2017). *El vehículo eléctrico: tipología y principales características*. España: Recuperado de https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/sostenibilidad/docs/Vehiculo_tipologia_caracteristicas.pdf editorial
27. International Energy Agency. (2019). *Global EV Outlook 2018*. Recuperado de <https://webstore.iea.org/global-ev-outlook-2018>.
28. Ionut, C. (2017). *Fotolineras*. Universidad Jaime Castellón, España: autor. Recuperado de <https://www.fisica.uji.es/> editorial.

29. Isla, L., Singla, M., Rodríguez, M., y Granada, I. (2019). *Análisis de Tecnología, industria, y mercado para vehículos eléctricos en América latina y el caribe*. Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de <https://publications.iadb.org/>
30. Martínez, D. (2011). *El impacto del vehículo eléctrico en la red de distribución* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña, España.
31. Maza, J., y Gómez, A. (2019). Sistema de recarga de vehículos eléctricos: revisión tecnológica e impacto en el sistema eléctrico. (M. d. Tecnología, Ed.) *Economía industrial*, 1(411), 35-44.
32. Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Plan nacional de energía 2017-2050*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/>
33. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Energía y Potencia Para Guatemala, los estadios del subsector eléctrico 1883-2017*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/>
34. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Política Energética 2019-2050*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/>
35. Montaña, F. (2016). *Centrales de generación basada en motores de combustión interna de doble combustible y su aplicación en el sector industrial* (Tesis de postgrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. Recuperado de <https://repositorio.usm.cl/>

36. Pallarés, M. (2002). *Hacia el motor superconductor: estudio de las interacciones entre un rotor superconductor y un estator convencional y de la viabilidad de uso para producir par y levitación* (Tesis doctoral). Institut de Ciència de Materials de Barcelona Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10803/6288>
37. Pallisé, J., Guillén, F., Alonso, J., Van Dijck, K., Chacón, j., Amarilla, J., Luque, R. (2009). *Guía del Vehículo Eléctrico*. Madrid, España: Consejería de Economía y Hacienda.
38. Pérez, D., Gutiérrez, M. C., y Mix, R. (2019). *Electromovilidad, panorama actual en América latina y el caribe*. Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de <https://publications.iadb.org/es/electromovilidad-panorama-actual-en-america-latina-y-el-caribe-version-infografica>
39. Piolet, F. (2012). Conocer los armónicos de las instalaciones eléctricas. *Industria al día*(95), 64-65.
40. Ramirez, S. (2009). *Redes de distribución de energía (Vol. III)*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7095>
41. RTR Energía S.L. (2012). *Los armónicos y la calidad de la energía eléctrica*. España. Recuperado de https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-15_08-18-34109895.pdf

42. Sanz, I. (2015). *Análisis de la evolución y el impacto de los vehículos eléctricos en la economía europea* (tesis de pregrado). Universidad Pontificia Comillas Madrid, España. Recuperado de: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/3803>
43. Sianaki, O., Hussain, O., y Tabesh, A. (2010). A Knapsack problem approach for achieving efficient energy consumption in smart grid for endusers' life style. *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, 159-164.
44. Valenzuela, F. (2012). *Modelado, simulación y puesta en marcha de una bancada de máquinas de imanes permanentes* (Tesis de pregrado). Universidad de Sevilla, España. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5173/fichero/>
45. Vallejo, J. (2017). *Situación de la ciudad de Medellín en cuanto a la capacidad que tiene en infraestructura de electrolineras para recargar de energía a los vehículos eléctricos*. (Tesis de pregrado). Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia, Colombia.
46. Vélez, J. (2017). *Análisis y estimación de la demanda eléctrica con la implementación de vehículos eléctricos conectados a una red de distribución en Cuenca y el Ecuador*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27353>

47. Zumbado, M. (2015). Autos eléctricos. *Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica*, 1(1) 1-6. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/>

ANEXOS

Anexo 1. Automóviles eléctricos



Fuente: Plug'n drive. (2012). *Nissan Leaf, Smart ED, and Mitsubishi i MiEV electric cars available for test drives during Plug'n Drive Ontario, Canada*. Consulta: octubre de 2019.

Recuperado de <https://www.flickr.com/photos/plugndrive/7796114560/>.

Anexo 2. Motocicleta eléctrica



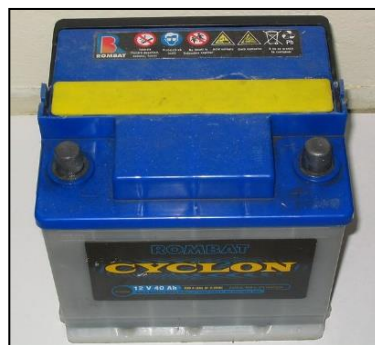
Fuente: Diario de Madrid. (2019). *Hacia la 'electrificación' de la flota de EMT*. Consulta: noviembre de 2019. Recuperado de <https://diario.madrid.es/blog/notas-de-prensa/hacia-la-electrificacion-de-la-flota-de-emt/>.

Anexo 3. Autobús eléctrico



Fuente: Diario de Madrid. (2019). *EMT compra 89 autobuses adicionales para 2017 y 2018*.
Consulta: noviembre de 2019. Recuperado de <https://diario.madrid.es/blog/notas-de-prensa/emt-compra-89-autobuses-adicionales-para-2017-y-2018/>.

Anexo 4. Batería de plomo y ácido



Fuente: SHADDACK. (2005). *Acumulador para automóvil*. Consulta: agosto de 2020.
Recuperado de <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Photo-CarBattery.jpg>.

Anexo 5. **Batería níquel e hidruro metálico**



Fuente: HATSUKARI. (2008). *High power Ni-MH Battery of Toyota NHW20 Prius*. Consulta: octubre de 2020. Recuperado de https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ni-MH_Battery_01.JPG.

Anexo 6. **Batería de litio**



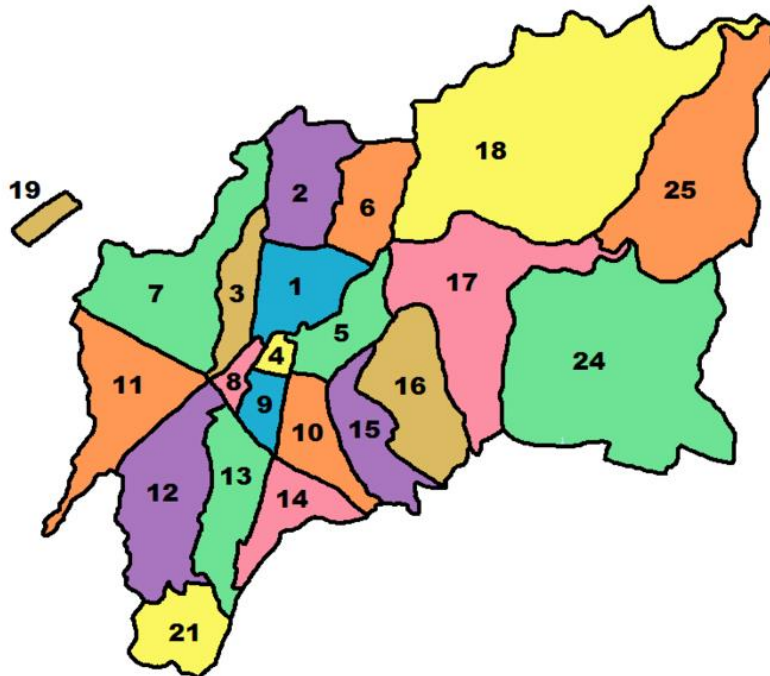
Fuente: ANEY. (2005). *Lithium Battery*. Consulta: octubre de 2019. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Lithium_Battery1.jpg.

Anexo 6. Paneles solares



Fuente: Pixabay. (2016). *Energía solar*. Consulta: noviembre de 2020. Recuperado de <https://pixabay.com/es/photos/energ%C3%ADa-solar-solares-electricidad-3297945/>.

Anexo 7. Zonas de la ciudad de Guatemala



Fuente: Ihielord. (2016). *Zonas de la ciudad de Guatemala*. Consulta: septiembre de 2020. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Guatemala_city_zones.png