



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

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

Edson Omar Mazariegos Marcial

Asesorado por el MA. Ing. José Rafael Argueta Monterroso

Guatemala, julio de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA 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

EDSON OMAR MAZARIEGOS MARCIAL

ASESORADO POR EL MA. ING. JOSÉ RAFAEL ARGUETA MONTERROSO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 2020

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

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA 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.

Edson Omar Mazariegos Marcial

Ref. EEPFI-070-2020
Guatemala, 27 de enero de 2020

Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Edson Omar Mazariegos Marcial** carné número **201313771**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular,

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. José Rafael Argueta Monterroso
Asesor

José Rafael Argueta Monterroso
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 2913

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y
Energético

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EIC-001-2020
Guatemala, febrero de 2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado 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 estudiante universitario Edson Omar Mazariegos Marcial, considerando que el protocolo es viable para realizar el Proceso de Graduación procedo con el AVAL, ya que cumple los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





DTG. 141.2020

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 Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA 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 estudiante universitario: **Edson Omar Mazariegos Marcial**, 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, julio de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas sus bendiciones en mi vida y nunca desampararme.
- Mis padres** Irma Marcial y Rafael Mazariegos, por siempre motivarme, apoyarme de forma incondicional y su amor que me llevaron hasta dónde me encuentro. Este logro es de ustedes, los amo.
- 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.
- Ingrid Cota** Por ayudarme y motivarme a no darme por vencido, siempre le estaré agradecido.
- Mis amigos** Gracias por ser una importante influencia y apoyo en esta etapa de mi vida, espero tenerlos el resto de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Pueblo de Guatemala	Por darme el privilegio de tener educación superior gratuita.
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.
Mis amigos de la Facultad	Con quienes viví una experiencia llena de horas de estudio, y también pudimos compartir muchas aventuras y buenos momentos. Agradeceré siempre su apoyo y amistad.
Mi familia	Por siempre alentarme a seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
3.1. Contexto general	5
3.2. Descripción del problema	5
3.3. Formulación del problema	6
3.4. Delimitación del problema.....	7
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. OBJETIVOS	11
5.1. General.....	11
5.2. Específicos	11
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Electromovilidad	15

7.1.1.	Reseña histórica de la electromovilidad.....	16
7.1.2.	Vehículos eléctricos.....	18
7.1.3.	Autobuses eléctricos	19
7.1.4.	Motocicletas eléctricas	21
7.2.	Conceptos fundamentales de los vehículos eléctricos.....	21
7.2.1.	Tipos de vehículos eléctricos.....	22
7.2.1.1.	Vehículo eléctrico de baterías.....	22
7.2.1.2.	Vehículo eléctrico de autonomía extendida.....	23
7.2.1.3.	Vehículo híbrido enchufable	24
7.2.1.4.	Vehículo híbrido.....	25
7.2.2.	Componentes del sistema de tracción en un vehículo eléctrico.....	26
7.2.3.	Motor eléctrico	28
7.2.4.	Tipos de motores utilizados en vehículos eléctricos	30
7.2.4.1.	Motor de inducción	31
7.2.4.2.	Motor síncrono.....	32
7.2.4.3.	Motor de corriente continua	32
7.2.4.4.	Motor de flujo axial.....	34
7.2.4.5.	Motor de reluctancia conmutada ...	35
7.2.5.	Baterías usadas en vehículos eléctricos	36
7.2.5.1.	Batería de plomo y ácido	38
7.2.5.2.	Batería níquel e hidruro metálico ..	39
7.2.5.3.	Baterías de iones de litio.....	40
7.3.	Carga de automóviles eléctricos	41
7.3.1.	Tipos de recargas.....	42
7.3.1.1.	Recarga lenta	43
7.3.1.2.	Recarga media o acelerada	43

	7.3.1.3.	Recarga rápida.....	44
	7.3.1.4.	Intercambio de batería	44
7.3.2.		Infraestructuras de recarga	44
	7.3.2.1.	Naturaleza de la energía suministrada al vehículo	45
	7.3.2.2.	Modo de transferencia de energía.	45
	7.3.2.3.	Flujo de energía	46
	7.3.2.4.	Velocidad de recarga	46
	7.3.2.5.	Conectores para los centros de recarga de automóviles eléctricos .	46
	7.3.2.5.1.	EEC 7/4 type F (Schuko).....	47
	7.3.2.5.2.	SAE J1772	47
	7.3.2.5.3.	VDE-AR-E 2623-2-2 (Mennekes)	47
	7.3.2.5.4.	CHAdeMO.....	47
	7.3.2.5.5.	Combo	48
7.3.3.		Normativa internacional de los sistemas de recarga.....	48
	7.3.3.1.	IEC 61851	48
	7.3.3.2.	Norma ISO 6469	49
7.4.		Sistemas de distribución de energía eléctrica	49
	7.4.1.	Clasificación de las redes de distribución.....	51
	7.4.1.1.	De acuerdo a su construcción	51
	7.4.1.2.	De acuerdo a voltajes nominales...51	
	7.4.1.2.1.	Redes de distribución secundarias.....	52
	7.4.1.2.2.	Redes de distribución primarias	52

	7.4.1.3.	De acuerdo a su ubicación geográfica	53
	7.4.1.4.	De acuerdo al tipo de carga	53
	7.4.1.5.	De acuerdo a la confiabilidad.....	54
7.4.2.		Transformadores de distribución	54
	7.4.2.1.	Núcleo	55
	7.4.2.2.	Devanados	55
	7.4.2.3.	Sistema de refrigeración	56
	7.4.2.4.	Aisladores.....	56
	7.4.2.5.	Características de los transformadores de distribución	56
7.4.3.		Conductores empleados en redes de distribución	57
	7.4.3.1.	Tipos de conductores eléctricos....	57
7.4.4.		Distorsión armónica.....	59
	7.4.4.1.	THD	59
	7.4.4.2.	Efectos de los armónicos en la red eléctrica	60
7.4.5.		Red eléctrica inteligente	61
7.5.		Matriz de generación eléctrica.....	62
	7.5.1.	Principales fuentes de generación de energía eléctrica.....	63
	7.5.1.1.	Energía solar	63
	7.5.1.2.	Energía eólica.....	64
	7.5.1.3.	Energía hidráulica.....	65
	7.5.1.4.	Energía de la biomasa	66
	7.5.1.5.	Energía geotérmica	67
	7.5.1.6.	Energía térmica	67
	7.5.1.7.	Motores de combustión interna.....	69

7.5.2.	Descripción de la matriz de generación eléctrica del país	69
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	73
9.	METODOLOGÍA	75
9.1.	Características del estudio.....	75
9.1.1.	Enfoque	75
9.1.2.	Alcance	76
9.1.3.	Diseño	77
9.2.	Unidades de análisis.....	78
9.3.	Variables	79
9.4.	Fases del estudio.....	80
9.5.	Resultados esperados	85
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	87
11.	CRONOGRAMA.....	93
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	95
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Automóviles eléctricos.....	19
2.	Autobús eléctrico.....	20
3.	Motocicleta eléctrica.....	21
4.	Diagrama del vehículo eléctrico puro	23
5.	Diagrama del vehículo eléctrico de autonomía extendida.....	24
6.	Diagrama del vehículo híbrido enchufable.....	25
7.	Diagrama del vehículo híbrido.....	26
8.	Esquema del funcionamiento de un vehículo eléctrico	27
9.	Esquema de un generador síncrono	29
10.	Esquema de motor de corriente continua	33
11.	Esquema de motor de flujo de axial	34
12.	Esquema de reluctancia conmutada	35
13.	Batería con celdas en serie	37
14.	Batería de plomo y ácido.....	39
15.	Batería níquel e hidruro metálico.....	40
16.	Batería de litio	41
17.	Paneles solares.....	63
18.	Cronograma de actividades a desarrollar	93

TABLAS

I.	Perturbaciones causadas por los armónicos.....	60
II.	Participación por tipo de tecnología	70
III.	Energía producida por tipo de tecnología.....	71
IV.	Técnicas de investigación a utilizar	78
V.	Variables en estudio	79
VI.	Descripción de la fase 1	81
VII.	Descripción de la fase 2.....	82
VIII.	Descripción de la fase 3.....	83
IX.	Descripción de la fase 4.....	84
X.	Resultados esperados	85
XI.	Análisis descriptivo de las variables	88
XII.	Recursos a utilizar	95

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.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
ICE	Motor de combustión interna.
SAT	Superintendencia de Administración Tributaria.
Smart grid	Red eléctrica inteligente.
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.

RESUMEN

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

Para implementar la electromovilidad es necesario conocer las características de esta tecnología, conocer los requisitos necesarios, las debilidades y fortalezas, así como las consecuencias que trae al sistema eléctrico.

El presente diseño de investigación busca conocer si en la ciudad de Guatemala existen algunas condiciones esenciales para la implementación de la electromovilidad, de acuerdo a las características de la matriz de generación de energía eléctrica del país derivado del aumento de demanda, y conocer si la red de distribución podrá soportar este aumento de demanda, así como ubicar los probables puntos de recarga rápida.

1. 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 la electromovilidad como una alternativa en temas de movilización puesto que ayuda a reducir la emisión de gases contaminantes, en dicho acuerdo los países firmantes se comprometen a reducir las emisiones de estos gases. 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 podría ayudar sería una diferenciación en las tarifas para los usuarios de automóviles eléctricos, con precios más reducidos. Este estudio evaluará algunas condiciones que conlleva 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 de estado al respecto, se buscará determinar si bajo las condiciones actuales se podrían implementar los automóviles eléctricos.

El término electromovilidad conlleva una serie de formas de transporte por lo que podemos hablar de vehículos, motocicletas, autobuses, bicicletas, camiones, entre otros. En este estudio se hará un análisis basado en las primeras tres formas mencionadas.

El sistema de distribución de energía eléctrica está conformado por líneas y subestaciones de transformación de electricidad, siendo la Empresa Eléctrica de Guatemala, Sociedad Anónima (EEGSA) la encargada de brindar el servicio de distribución en la ciudad de Guatemala, se realizará la evaluación de la red tomando en cuenta las curvas de cargas, se analizará el comportamiento con la implementación de electromovilidad, y las condiciones técnicas de la red como cableado y centros de transformación, y se hará un análisis a través de flujos de carga el sistema de baja tensión.

El sistema de generación de energía nacional está conformado por centrales hidroeléctricas, turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna, centrales geotérmicas, fotovoltaicas, eólicas, entre otras, este estudio evaluará la curva de demanda nacional y si de acuerdo a la capacidad instalada el sistema eléctrico nacional es capaz de brindar la energía necesaria.

Los automóviles eléctricos para su recarga requieren de una fuente que los abastezcan en diferentes puntos, los cuales dependerán de varios parámetros que están ligados en su utilización, consumo, accesibilidad y disponibilidad en cuanto a la recarga de sus baterías, para el acceso a la fuente de energía que alimenta a su motor en este caso la energía eléctrica, por lo que el estudio plantea posibles puntos para realizar las recargas.

2. ANTECEDENTES

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.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

Los automóviles eléctricos han tomado gran relevancia debido a sus múltiples beneficios sobre todo para el medio ambiente, el cambio climático es una realidad cada día más tangible y estos automóviles ofrecen la posibilidad de reducir las emisiones de efecto invernadero. El desarrollo tecnológico ha permitido que los automóviles eléctricos tengan una mejor autonomía, precio, confiabilidad, desarrollo de 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 debido a los compromisos medioambientales que poseen estos países, implementando políticas que incluyen incentivos fiscales, así como desarrollo de infraestructura necesaria. Más de un millón de vehículos eléctricos se pusieron en circulación en el año 2017, alcanzado un parque total de más de tres millones de vehículos, habiendo experimentado un incremento del 50 %, con respecto a los valores de 2016.

3.2. 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 por objetivo desarrollar

propuestas de mitigación de los efectos del cambio climático producto por 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 fin de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero 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. La ciudad de Guatemala cuenta con una carga vehicular bastante densa, al día circulan alrededor de 1.5 millones de vehículos según la Entidad Metropolitana Reguladora de Transporte y Tránsito –Emetra- sin contar el transporte público y las motocicletas. La Política Energética 2019-2050 hace mención de lo necesario que es reforzar los mecanismos que viabilicen las opciones de adquisición de vehículos eléctricos, a pesar de que se mencionan algunas acciones para el cumplimiento de estos objetivos, carecen de rutas de acción bien definidas que promuevan e incentiven el uso de esta tecnología.

3.3. 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 técnicas y operativas deberían contemplar los centros de recarga para electromovilidad?

3.4. Delimitación del problema

Actualmente la ciudad de Guatemala no cuenta con el desarrollo de infraestructura necesaria para la implementación 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 si la red de distribución se encuentra en la capacidad de suministrar esta demanda, realizando un análisis sobre la curva de demanda de los usuarios y realizando estudio sobre el flujo de carga, evaluar en qué medida aumenta la demanda de energía, y conocer qué características deben tener los centros de recarga.

4. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo se circunscribe dentro de las líneas de investigación, análisis e impactos de la innovación tecnológica, debido a que la implementación de los automóviles eléctricos en Guatemala representaría un avance hacia las tendencias globales, así mismo se encuentra dentro de la línea de investigación análisis y tendencias en la matriz energética nacional, regional y global, ya que se analiza en base la matriz de generación actual si esta sería capaz de suministrar la energía necesaria para los automóviles eléctricos.

El estudio busca analizar las condiciones eléctricas que conlleva la implementación de electromovilidad, con esta forma de movilización se vería beneficiada la población en general. En Guatemala no existen planes y políticas que se encaminen a disminuir la contaminación ambiental y sonora provocada por los automóviles con motor de combustión interna, el estudio nos pondrá en contexto sobre algunas de las consideraciones que se deben tomar en cuenta para la implementación de los automóviles eléctricos; el estudio puede marcar la pauta para que instituciones del gobierno y privadas ejecuten las acciones necesarias para el óptimo desarrollo de esta forma de movilización.

Desde el punto de vista energético los automóviles eléctricos podrían ayudar a aplanar la curva de demanda de energía, entre otros beneficios. Al abordar la electromovilidad se contemplan todas las formas de movilidad eléctrica, sin embargo, en este estudio se abordarán bajo la perspectiva de los vehículos eléctricos, las motocicletas eléctricas, y el transporte público eléctrico. Luego de analizar y conocer las características de la red de distribución y de la matriz de generación, tomando en cuenta curvas de demanda y cantidad de

energía requerida y suministrada, basado en el consumo promedio de los automóviles eléctricos, tomando en cuenta una penetración en el mercado del 25 % sobre el parque automovilístico actual, se determinará si es posible llegar a este nivel de electromovilidad, evaluando la red de distribución y matriz de generación, luego se procederá analizar las características técnicas y operativas de los centro de recarga. Dentro del estudio también se incluirá una estimación de los armónicos que se introduciría a la red eléctrica de distribución.

5. OBJETIVOS

5.1. General

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

5.2. 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.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

El trabajo de investigación pretende satisfacer la necesidad de conocer si existen las condiciones en materia de energía eléctrica para la implementación de electromovilidad en la ciudad de Guatemala, evaluando algunas de las condiciones que se deben tener para el óptimo desarrollo de esta forma de transporte.

Al evaluar y obtener los resultados se podrá determinar qué aspectos deben ser mejorados, qué aspectos están óptimos, y puede marcar la pauta para que las instituciones involucradas puedan realizar las mejoras necesarias. El trabajo se centra en tres aspectos importantes, matriz de generación, red de distribución y puntos de recarga.

El impacto en la matriz de generación causado por la implementación de electromovilidad dependerá de las características de la demanda que se plantea, por lo que al aplicar el análisis cuantitativo se podrá determinar en qué medida aumentará la demanda y con la capacidad instalada de las centrales de generación poder determinar si se podrá cubrir ese incremento en la demanda.

El impacto en la red de distribución por la implementación de electromovilidad, dependerá de la forma en que los usuarios realicen la recarga de los automóviles eléctricos por lo que se deben plantear escenarios de horarios de recarga, tomando en cuenta la curva de carga promedio de los usuarios de la ciudad de Guatemala y agregar la energía requerida para los automóviles eléctricos.

Las características de diseño y operativas que deben tener los centros de recarga para electromovilidad, se deben adaptar a las características de la ciudad, y adaptar los centros de recarga en puntos de acceso público y privados, pero esta cobertura se dará en función de la necesidad que se tenga de los mismos tomando en cuenta la cantidad de automóviles eléctricos que estén en circulación.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. 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.

7.1.1. 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 a la década de 1830, el escocés 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 se debió a la escases 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).

7.1.2. 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 del mismo.

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*).

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

7.1.3. **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).

Figura 2. **Autobús eléctrico**



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

7.1.4. 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).

Figura 3. **Motocicleta eléctrica**



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

7.2. 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.

7.2.1. Tipos de vehículos eléctricos

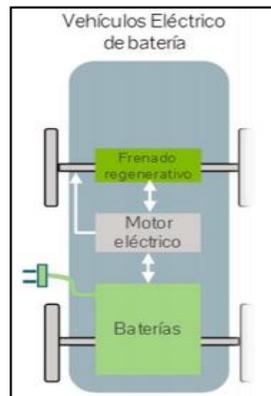
Los vehículos eléctricos se pueden clasificar por sus características constructivas y forma de proveerse de energía, García (2015) lo realiza de la siguiente manera:

7.2.1.1. 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 a 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 al 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 4. **Diagrama del vehículo eléctrico puro**

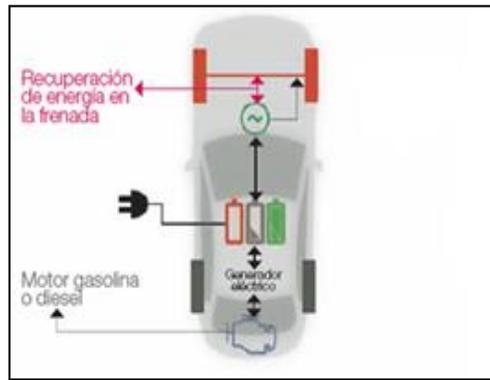


Fuente: IONUT. (2017). *Fotolineras*.

7.2.1.2. 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 5. **Diagrama del vehículo eléctrico de autonomía extendida**



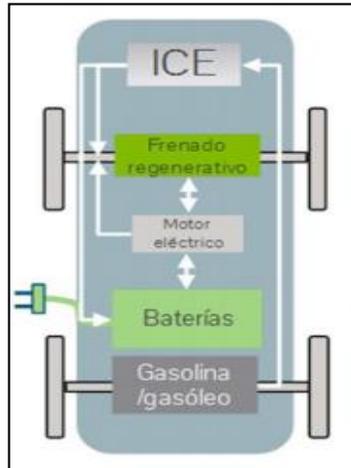
Fuente: VILCACHAGUA. (2018). *El vehículo eléctrico*. Recuperado de <http://docplayer.es/81347622-EI-vehiculo-electrico-ing-jorge-vilcachagua.html>

7.2.1.3. **Vehículo híbrido enchufable**

Estos vehículos resultan ser una mezcla entre vehículo eléctrico y vehículo de combustión interna. De acuerdo, con Hinstroza (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 6. **Diagrama del vehículo híbrido enchufable**



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

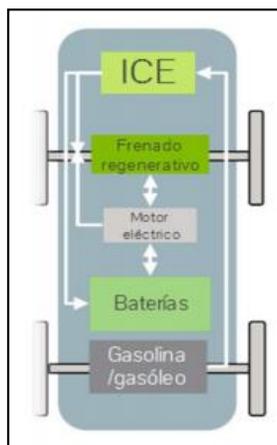
7.2.1.4. **Vehículo híbrido**

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 del mismo (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 7. **Diagrama del vehículo híbrido**

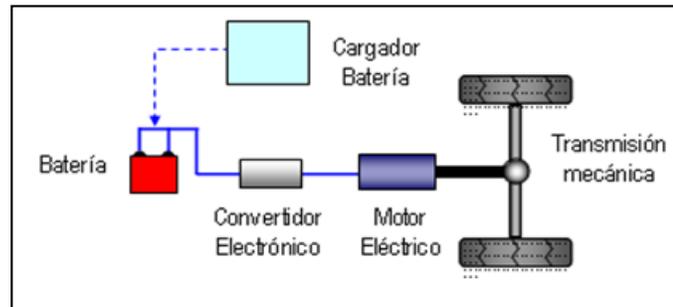


Fuente: IONUT. (2017). *Fotolineras*.

7.2.2. Componentes del sistema de tracción en un vehículo eléctrico

Según, Velez (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 8. **Esquema del funcionamiento de un vehículo eléctrico**



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

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.

- Conversor 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).

7.2.3. 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).

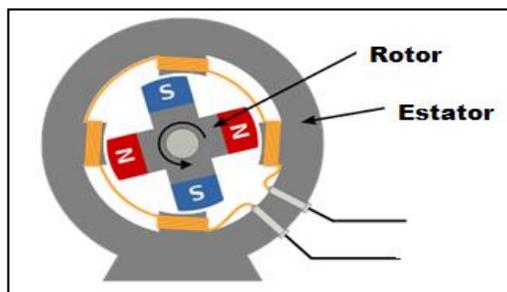
En 1832 fue inventado el primer motor eléctrico continuo de uso práctico, esto debido al científico británico, Esturión de Guillermo, mientras que el primero en haberse elaborado para ser usado comercialmente fue construido por el estadounidense, Thomas Davenport, patentado en 1837 en consecuencia al alto costo de la energía proveniente de una batería, los motores no fueron económicamente rentables (García, 2015).

Los motores los podemos dividir de acuerdo a la corriente que los alimenta: motores de corriente continua y motores de corriente alterna, estos últimos se dividen en motores asíncronos y síncronos.

Por su parte, García (2015) señala que, en 1887, Nikola Tesla, construyó y patentó los motores asíncronos. El uso de los motores lleva decenas de años en el mercado, aunado al desarrollo tecnológico ha favorecido el mejoramiento de su eficiencia, rendimiento, y de sus piezas. Según, Aller (2004) las máquinas eléctricas rotativas convencionales, poseen algunas características en común tales como:

- Un eje mecánico con el que se efectúa el intercambio de energía.
- Parte estática o inmóvil llamada estator.
- Parte móvil llamada rotor, exclusivo de las máquinas cilíndricas.
- El flujo magnético periódico.
- Generalmente son cilíndricas.

Figura 9. **Esquema de un generador síncrono**



Fuente: EDOARADO. (2009). *Esquema de un generador síncrono de dos pares de polos con inductor de imanes permanentes*. Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Alternador.svg>.

Aller (2004) indica que: “Las máquinas eléctricas pueden ser diseñadas de tal manera que en el desarrollo de 2π radianes existan varios polos norte y varios polos sur” (p. 70). Dentro de las características que deben tener estos dispositivos señala que “El rotor y el estator tienen el mismo número de pares de polos, porque en caso contrario no es posible producir torque” (p. 72). Para describir estas máquinas, Aller, señala que, existe una ecuación denominada “condición de torque promedio”, que explica en términos de la velocidad mecánica del sistema ω_m , la frecuencia angular de las corrientes del estator ω_e y la frecuencia angular de las corrientes del rotor ω_r , el comportamiento de la rotación de las maquinas, como debe prevalecer en equilibrio para que la máquina gire.

$$\omega_m + \mathcal{K}\omega_e \pm \omega_r = 0 \quad (1)$$

Los motores asíncronos están constituidos por un devanado inductor ubicado en el estator o parte fija, por el que se introduce la corriente alterna, de determinada frecuencia. Aller (2004) también señala que “La velocidad de rotación de la máquina es directamente proporcional a la frecuencia de alimentación e inversamente proporcional a los polos de la máquina” (p. 79). El motor síncrono funciona de manera similar al asíncrono con la discrepancia que el inductor se encuentra en la parte móvil y el inducido en la parte fija de la máquina, tiene el inconveniente que gira una velocidad fija, por lo que sus aplicaciones como motor son pocas, mientras que como generador es muy utilizado.

7.2.4. Tipos de motores utilizados en vehículos eléctricos

Los motores usados en los vehículos eléctricos dependen de los requerimientos constructivos, según García (2015) podemos mencionar:

7.2.4.1. Motor de inducción

Es un tipo de motor de corriente alterna en el que la corriente eléctrica del rotor necesaria para producir el torque es inducida por electromagnetismo de la bobina del estator. El motor de inducción puede obtener torque promedio diferente de cero en un amplio rango de velocidades mecánicas, las corrientes que circulan por el rotor se ajustan por el fenómeno de inducción electromagnética. Se fija la frecuencia de las corrientes en el estator ω_e , y se produce un campo electromagnético en el entrehierro de la máquina que gira mecánicamente con la frecuencia angular de estas corrientes. Como el rotor gira a la velocidad mecánica ω_m , los conductores del rotor cortan el campo magnético producido en el estator con una velocidad que es la diferencia entre ω_e y ω_m . La diferencia porcentual entre estas dos velocidades se conoce como deslizamiento de la máquina. (Aller, 2004, p. 80)

Lo anterior se puede describir a través de la siguiente ecuación:

$$s = \frac{\omega_e - \omega_m}{\omega_e} * 100 \quad (2)$$

De acuerdo con, García (2015) en el momento del arranque, la corriente inducida en el rotor es muy alta y el flujo de rotor (opuesta al del estator) es máximo, como consecuencia, la impedancia del estator es muy baja y la corriente absorbida de la red es muy alta, pudiendo llegar a valores de hasta 7 veces la intensidad nominal. El valor elevado de corriente es de algunos milisegundos por lo que ese valor no hace ningún daño al motor, y el elevado torque de arranque hace que el rotor gire de inmediato. El motor de inducción constituye una de las máquinas más usadas dentro de la industria, ya que es utilizada para poner en

movimiento en la mayoría de objetos, son máquinas muy robustas, con bajo costo y con eficiencia cercana al 90 %.

7.2.4.2. Motor síncrono

En concordancia con, Aller (2004) los motores sincrónicos se les provee de corriente continua en el devanado del rotor, es decir $\omega_r=0$. Con la condición descrita en la ecuación (1), se obtiene:

$$\omega_m \pm \mathcal{K}\omega_e = 0 \quad (3)$$

Aller (2004) indica que “Los motores sincrónicos sólo pueden producir torque promedio diferente de cero cuando la velocidad mecánica coincide con la velocidad angular de las corrientes inyectadas en el estator” (p. 80). Es decir, el motor debe de forma sincrónica con las corrientes estatóricas.

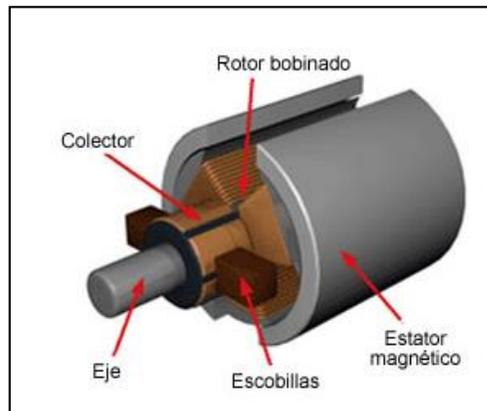
Por su parte, Valenzuela (2012) los vehículos eléctricos utilizan motores sincrónicos de imanes permanentes, que funcionan de la misma forma que los motores sincrónicos tradicionales, con la discrepancia de la sustitución del devanado rotórico por imanes permanentes. Por lo cual poseen mejor rendimiento, menor peso y alta densidad de potencia.

7.2.4.3. Motor de corriente continua

Según Mora (2003) estos motores “Poseen un devanado estatórico por el cual fluye corriente continua y una armadura en el rotor alimentada por una fuente de corriente continua y un colector que permite la inversión de las corrientes en la armadura” (p. 148). El colector, que se muestra en la figura, permite variar los

polos de la tensión con la que es alimentada la bobina del rotor a la vez que gira el rotor.

Figura 10. **Esquema de motor de corriente continua**



Fuente: Mi arduino. (2016). *Motores*. Recuperado de <http://www.iescamp.es/miarduino/servos-motores-de-corriente-continua-cc-y-motores-paso-a-paso/>.

De acuerdo con, Valenzuela (2012) los vehículos eléctricos utilizan este tipo de motores pero sin escobillas, indica que “su funcionamiento es igual que el de la máquina síncrona tradicional, con la excepción de la sustitución del devanado rotórico por imanes permanentes” (p. 20), la conmutación se realiza de forma electrónica mediante tecnología incorporada en el motor.

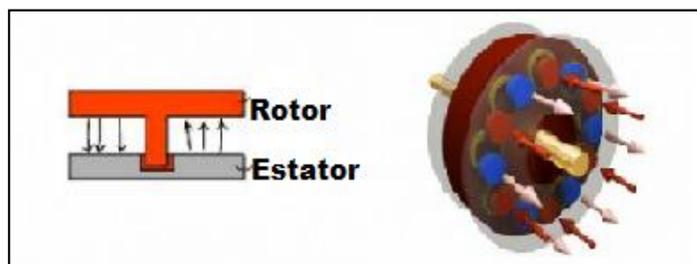
Con respecto a su velocidad Valenzuela (2012) señala que “Debe estar sincronizada con la de conmutación, lo que requiere incorporar sensores de posición, y que la diferencia entre este motor y un síncrono de imanes permanentes es que su marcha no es tan regular como la del síncrono” (p. 20).

7.2.4.4. Motor de flujo axial

De acuerdo con, Pallarés (2002) este motor posee un devanado inductor que crea un campo magnético paralelo al eje de rotación del rotor, es decir el devanado inductor crea un campo magnético paralelo al eje de giro del rotor.

En concordancia, Valenzuela (2012) indica que el funcionamiento de este “No cambia con respecto al síncrono de imanes permanentes, con la salvedad de que cierran los circuitos magnéticos en dirección axial permitiendo así reducir el tamaño y peso de los motores”. Asimismo, indica que dichos motores “Permiten ser integrados en las ruedas de los vehículos eléctricos lo que simplifica enormemente los acoplamientos mecánicos y reduce el espacio del mismo” (p. 20). La forma constructiva del da la oportunidad de dividir el estator en dos discos que actúan en el rotor, contrarrestando así las fuerzas axiales de la forma en que se muestra en seguida.

Figura 11. Esquema de motor de flujo de axial



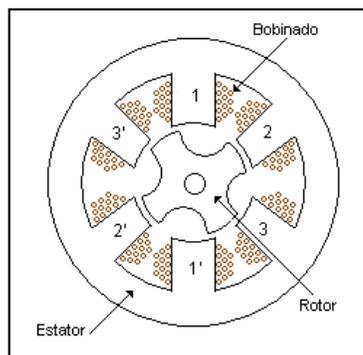
Fuente: García. (2018). *Alta potencia y máxima eficiencia: Magnax quiere revolucionar el coche eléctrico con un motor axial*. Recuperado de <https://www.autonocion.com/magnax-motor-electrico-flujo-axial/>

7.2.4.5. Motor de reluctancia conmutada

García (2015), describe que estos dispositivos poseen “Un eje de hierro que puede girar apoyado sobre unos rodamientos, o también los dientes de un rotor de hierro, se orientan en un campo magnético producido gracias a una corriente eléctrica en los polos del estator”. Asimismo, señala que cuando permuta el campo magnético, el núcleo de hierro procederá a girar. Cuando el rotor posee más dientes, “se puede comparar su forma a la de una rueda dentada de gran espesor” (p. 8).

El rotor se encuentra dentado de un componente ferromagnético, dichos motores necesitan convertidores electrónicos, con los que se puede cambiar la velocidad y el torque de rotación. Además de poseer baja inercia, lo que les permite dar una respuesta rápida, algunos de los inconvenientes que poseen son la presencia de un torque variable, bajo factor de potencia y la necesidad de sensores de posición (Valenzuela, 2012).

Figura 12. Esquema de reluctancia conmutada



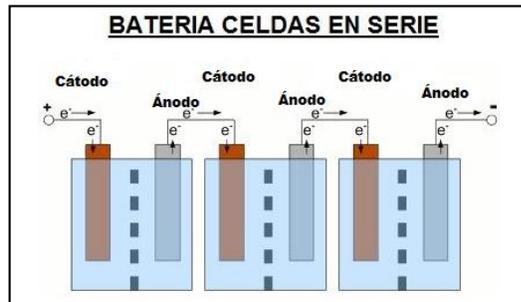
Fuente: Delgado. (2011). *Motores paso a paso*. Recuperado de <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com/p/motores-paso-paso.html>

7.2.5. 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 13. **Batería con celdas en serie**



Fuente: Área tecnología. (2012). *Baterías y acumuladores*. Recuperado de <https://www.areatecnologia.com/baterias-y-acumuladores.htm>.

Pallisé et al. (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 al elemento químico que utilizan de la siguiente manera:

7.2.5.1. 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 electrólito 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.

Figura 14. **Batería de plomo y ácido**



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

7.2.5.2. 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.

Figura 15. **Batería níquel e hidruro metálico**



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

7.2.5.3. **Baterías de iones de litio**

En concordancia, Pallisé et al. (2009) la primer 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).

Figura 16. **Batería de litio**



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

7.3. **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. Uno 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 electrolineras, 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).

7.3.1. 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:

7.3.1.1. 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.

7.3.1.2. 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, Singla, Rodríguez, y Granada, 2019).

7.3.1.3. 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, Singla, Rodríguez, y Granada, 2019). Esta tecnología requiere de las inversiones necesarias para mantener el lugar con un nivel de seguridad industrial adecuado.

7.3.1.4. 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).

7.3.2. 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:

7.3.2.1. 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).

7.3.2.2. 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).

7.3.2.3. 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, permiten la posibilidad de 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).

7.3.2.4. 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. Dentro de los cargadores de automóviles eléctricos existe la posibilidad de una recarga lenta, semirápida y rápida como fue mencionado con anterioridad (Maza y Gómez, 2019).

7.3.2.5. 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:

7.3.2.5.1. 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.

7.3.2.5.2. 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.

7.3.2.5.3. 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.

7.3.2.5.4. 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.

7.3.2.5.5. 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.

7.3.3. Normativa internacional de los sistemas de recarga

La normativa internacional está dividida en dos grandes grupos, que son de acuerdo a estándares de Estados Unidos y estándares de Europa. Dentro de estas normas podemos mencionar:

7.3.3.1. IEC 61851

IEC 61851 es una normativa internacional creada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), su objetivo es establecer los estándares de los sistemas conductivos de los automóviles eléctricos, está dividida en varias partes dentro de las que podemos mencionar:

- IEC 61851-1: establece los requisitos generales, define, los modos de recarga de los automóviles eléctricos, los sistemas de protección para evitar el shock eléctrico, las conexiones entre la red y los automóviles, así como los cables utilizados en la infraestructura de recarga.
- IEC 61851-21-1: establece los requisitos de compatibilidad electromagnética para conexión conductora a un suministro de corriente alterna o directa.

- IEC 61851-21-2: define los requisitos de compatibilidad electromagnética para cualquier componente externo del sistema utilizado para cargar los automóviles eléctricos con energía eléctrica por transferencia de potencia conductiva.
- IEC 61851-22: establece los requisitos de las estaciones de carga en corriente alterna de los automóviles eléctricos.
- IEC 61851-23: define las características de las estaciones de carga en corriente directa de los automóviles eléctricos.
- IEC 61851-24: establece los lineamientos de la comunicación digital entre una estación de carga DC y un vehículo eléctrico.

7.3.3.2. Norma ISO 6469

Esta norma de la Organización Internacional de Normalización -ISO- por sus siglas en inglés, dicha normativa fija los requisitos de seguridad para los automóviles eléctricos específicamente los sistemas donde se almacena la energía, así como para la protección de las personas dentro y fuera del automóvil y del entorno del mismo (Hinestroza, 2014).

7.4. 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)

7.4.1. Clasificación de las redes de distribución

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

7.4.1.1. De acuerdo a 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, cruces, 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.

7.4.1.2. De acuerdo a voltajes nominales

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

7.4.1.2.1. Redes de distribución secundarias

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).

7.4.1.2.2. Redes de distribución primarias

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.

7.4.1.3. De acuerdo a su ubicación geográfica

En Guatemala se encuentran dos divisiones dentro de esta clasificación, que son servicios urbanos y servicios rurales, de acuerdo a 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.

7.4.1.4. De acuerdo al 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.

7.4.1.5. De acuerdo a 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.

7.4.2. 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:

7.4.2.1. Núcleo

Es un sistema que forma el circuito magnético, construido de chapas de acero al silicio, laminadas en frío, estas chapas se colocan formando columnas que es donde se colocan los devanados.

7.4.2.2. Devanados

Estos conforman el circuito eléctrico de transformador, está constituido por conductores recubiertos de aislante que se disponen alrededor de las columnas del núcleo.

7.4.2.3. Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración busca disminuir las pérdidas en la máquina, así como evitar el deterioro de los elementos que conforman la misma, y afectar la vida útil del transformador. Existen transformadores secos, usados en potencias pequeñas, para potencias elevadas se usan sistemas de refrigeración de baños de aceite, el aceite funciona como refrigerante y aislante.

7.4.2.4. Aisladores

Mora indica que son dispositivos usados para llevar los bornes al exterior de la máquina, están hechos de porcelana, rellenos de aire o aceite. Están dispuestos de tal manera de evitar la aparición de arcos eléctricos en los bornes.

7.4.2.5. 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.

7.4.3. 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 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.

7.4.3.1. Tipos de conductores eléctricos

De acuerdo a, Ramirez (2004) se puede disponer de diferentes tipos de conductores, pueden ser alambres, cables, barras, entre otros. Los conductores más comunes son:

- Alambre: Es una barra o filamento de metal laminado o extruido cuya longitud es muy grande en comparación con el eje mayor de su sección transversal.
- Conductor trenzado: Es un conductor compuesto de un grupo de alambres, usualmente retorcidos o cualquier combinación de grupos de alambres.
- Cable: Está conformado por un conductor trenzado, o una combinación de conductores aislados entre sí.
- Cable concéntrico: Consiste en un cable trenzado compuesto de un núcleo central rodeado por una o más capas de alambres o grupos de alambres dispuestos helicoidalmente.
- Conductor de trenzado concéntrico: Consiste en un conductor construido con un núcleo central rodeado por una o más capas de alambres dispuestos helicoidalmente.
- Conductores aislados: Este tipo de conductores se usan en niveles de tensión menores a los 1000 voltios. Poseen un recubrimiento que garantiza la resistencia a las condiciones de intemperie, usados en circuitos secundarios.
- Conductores desnudos: Este tipo de conductores se usan en niveles de tensión superiores a los 1000 voltios y no utilizan aislamiento (pp. 68 - 69).

7.4.4. Distorsión armónica

Las Normas Técnicas del Servicio de Distribución -NTSD- (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.

7.4.4.1. THD

De acuerdo con RTR Energía S.L (2012) los THD son la resultante de los armónicos, es decir la distorsión armónica total -THD- por sus siglas en inglés (*Total Harmonics Distortion*). Este cálculo ayuda a calificar de manera general el nivel de distorsión de la red.

La norma CEI 61000-2-2 establece la distorsión armónica total como una relación entre la amplitud de la frecuencia fundamental y el valor eficaz de las componentes armónicas, como se muestra a continuación:

$$THD_{f_{2-n}} = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + h_4^2 + \dots + h_n^2}}{h_1} * 100 \quad (4)$$

La normativa nacional no clasifica el índice de THD de acuerdo al daño que pueden provocar, Piolet (2012) realiza la siguiente clasificación, en THD de voltaje.

Tabla I. **Perturbaciones causadas por los armónicos**

Índice	Perturbaciones detectadas
THDV < 5 %	Nada en general.
5 % < THDV < 8 %	Mal funcionamiento de material anormalmente sensible.
8 % < THDV < 10 %	Probable mal funcionamiento del material.
THDV > 10 %	Seguro mal funcionamiento del material.

Fuente: Piolet. (2012). *Conocer los armónicos de las instalaciones eléctricas.*

7.4.4.2. Efectos de los armónicos en la red eléctrica

RTR Energía S.L (2012), lista algunos de los efectos que provocan los armónicos en la red eléctrica:

- Aumento de la potencia a transportar, empeorando el factor de potencia de la red.
- Disparo intempestivo de interruptores automáticos.
- Sobrecargas en los conductores.
- Vibraciones y sobrecargas en las máquinas.
- Creación de inestabilidad en el sistema eléctrico.

- Mal funcionamiento de los relés de protección.
- Disminución de la impedancia de los condensadores.
- Mediciones erróneas en equipos de medida.
- Perturbaciones en equipos de control.

7.4.5. Red eléctrica inteligente

De acuerdo con, Giraldo (2015), las redes inteligentes o Smart grid, se refieren a la manera de “Administrar eficientemente la electricidad con la ayuda de tecnología informática para optimizar la producción, distribución y consumo de energía con el fin de equilibrar de la mejor manera posible la oferta y demanda de potencia eléctrica entre generadores y consumidores” (p. 34).

La colección de tecnologías, conceptos y metodologías, que permite a toda la cadena de electricidad, que incluye generación, transmisión y distribución, se complementen por un entorno integrado donde los procesos de negocio, objetivos y necesidades de todos son suplidos de manera eficiente (Farhangi, 2010).

El objetivo principal de una red inteligente es entregar la cantidad óptima de información y control de carga para clientes, distribuidores y operadores de red para reducir las demandas y los costos del sistema mientras aumenta la eficiencia energética (Cecati, Morkryani, Pícolo, y Siano, 2010).

Los usuarios al recibir información de su consumo y los costos del mismo en tiempo real, cambiarán su comportamiento de consumo con el objetivo de ahorrar en sus facturas (Sianaki, Hussain, y Tabesh, 2010).

Para poder recibir la información y tener control en tiempo real del estado del sistema es necesario implementar en el sistema dispositivos inteligentes, los cuales serán los encargados de monitorear y recopilar toda la información necesaria para permitir la optimización del uso de las redes de suministro de electricidad, una administración total de los recursos y la toma de decisiones por parte de los usuarios que le permita autonomía sobre sus facturas (Cecati, et al. 2010).

7.5. 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 al 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.

7.5.1. 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.

7.5.1.1. 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).

Figura 17. Paneles solares



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

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, contruidos 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).

7.5.1.2. 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).

7.5.1.3. 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 potencial 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 al 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).

7.5.1.4. 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).

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).

7.5.1.5. 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).

7.5.1.6. 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 la misma.

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).

7.5.1.7. 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).

7.5.2. 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 II. **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 III. **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.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Electromovilidad

1.1.1. Reseña histórica de la electromovilidad

1.1.2. Vehículos eléctricos

1.1.3. Autobuses eléctricos

1.1.4. Motocicletas eléctricas

1.2. Conceptos fundamentales de los vehículos eléctricos

1.2.1. Tipos de vehículos eléctricos

1.2.2. Componentes del sistema de tracción en un vehículo eléctrico

1.2.3. Motor eléctrico

1.2.4. Tipos de motores utilizados en vehículos eléctricos

1.3. Baterías usadas en vehículos eléctricos

1.3.1. Carga de automóviles eléctricos

1.3.2. Tipos de recargas

1.3.3. Infraestructuras de recarga

- 1.3.4. Normativa internacional de los sistemas de recarga
- 1.4. Sistemas de distribución de energía eléctrica
 - 1.4.1. Clasificación de las redes de distribución
 - 1.4.2. Transformadores de distribución
 - 1.4.3. Conductores empleados en redes de distribución
 - 1.4.4. Distorsión armónica
- 1.5. Red eléctrica inteligente
 - 1.5.1. Matriz de generación eléctrica
 - 1.5.2. Principales fuentes de generación de energía eléctrica
 - 1.5.3. Descripción de la matriz de generación eléctrica del país

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

Las características de la metodología del estudio contemplan el enfoque, alcance, diseño y unidad de análisis del mismo, que se describen a continuación.

9.1.1. Enfoque

El estudio tiene un enfoque cuantitativo ya que utiliza la recolección y análisis de los datos para afinar las preguntas de investigación, también utiliza 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, siendo las variables objeto de análisis. A nivel mundial la electromovilidad ha tenido un importante crecimiento en los últimos años, en el país poco o nada se ha hecho para implementarla, con base a esto se recolectarán 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.

Cumple con los requisitos de indagar desde una perspectiva innovadora y prepara el terreno para nuevos estudios, ya que se evaluarán 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.

9.1.2. Alcance

El estudio posee un alcance exploratorio por cumplir con las siguientes características:

- Investiga un problema poco estudiado, ya que en Guatemala no se han implementado políticas de Estado que favorezcan el uso de automóviles eléctricos, en la actualidad no se usan estos automóviles, a pesar de ser un tema ampliamente abordado a nivel mundial por el impacto medio ambiental de estos.
- Indaga 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 debe determinar a través de la evaluación cómo se espera que se comporten con la implementación de electromovilidad.
- Ayuda a identificar conceptos promisorios, puesto que el estudio ayudará a identificar una ruta adecuada en materia de energía eléctrica para que la electromovilidad pueda desarrollarse 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.
- Prepara 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.

9.1.3. Diseño

El estudio tiene un diseño de investigación no experimental, ya que no se manipulan deliberadamente las variables, sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después ser analizados. Además, será transversal, ya que se recolectan datos en un solo momento, se evaluará de acuerdo a la información y características actuales, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado, variables como el parque automovilístico, o la matriz de generación. Utilizando métodos estadísticos descriptivos se podrá cuantificar en qué medida se ve afectada la red de distribución, así como análisis a través de flujos de carga, 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 serán de 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 evaluará 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, es decir del total que existen en la actualidad, cómo se comportaría la red de distribución y la matriz de generación con un 25 % del parque automovilístico eléctrico, con un 25 % del total de motocicletas eléctricas, más un 25 % del parque de los autobuses urbanos eléctricos.

Tabla IV. **Técnicas de investigación a utilizar**

Objetivo	Técnica de investigación
<p>Determinar el impacto en la red de distribución causado por la implementación de electromovilidad.</p>	<p>Se evaluará con análisis estadístico a través de medidas de tendencia central, de acuerdo a la cantidad de energía que es suministrada actualmente en la ciudad y a las características técnicas que tiene la red, cómo se ve afectada ésta por el aumento de demanda derivado de los automóviles eléctricos a través de flujos de carga, se tendrán en cuenta las variables de habitantes de la ciudad de Guatemala, cantidad de usuarios conectados en la red de distribución de la ciudad, parque automovilístico de la ciudad y los automóviles eléctricos. Usando la energía promedio que utiliza un automóvil eléctrico y la cantidad de automóviles registrados en la ciudad.</p>
<p>Determinar el impacto en la matriz de generación causado por la implementación de electromovilidad.</p>	<p>Se evaluará 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, determinado si la actual matriz de generación de energía eléctrica podría abastecer la demanda planteada. Tomando en cuenta las variables, matriz de generación y vehículos eléctricos.</p>
<p>Identificar las características técnicas y operativas que deberían tener los centros de carga para electromovilidad.</p>	<p>Con análisis estadístico a través de medidas de tendencia central, con la cantidad de automóviles eléctricos supuestos que circularían por la ciudad, se determinarán 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.</p>

Fuente: elaboración propia.

9.2. Unidades de análisis

La población en estudio será el parque vehicular de la ciudad de Guatemala, y el sistema eléctrico nacional, debido a que se evaluará 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.

9.3. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla V. Variables en estudio

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

Fuente: elaboración propia.

9.4. Fases del estudio

- Fase 1. Revisión documental

Se realizará 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 los mismos. Se recolectará la información de la energía suministrada de manera habitual en la ciudad de Guatemala, así como 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 recogerá la información correspondiente al parque vehicular actual, con información de la Municipalidad de Guatemala se obtendrán datos sobre el transporte público urbano, y los recorridos de los automóviles en la ciudad de Guatemala. Se revisará la literatura relacionada de acuerdo a la forma en que se podría implementar la electromovilidad en la ciudad de Guatemala.

Tabla VI. Descripción de la fase 1

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

Fuente: elaboración propia.

- 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, las características de los conductores colocados, se evaluarán los escenarios de recarga de los automóviles eléctricos, de acuerdo a

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, y así determinar en qué medida se ve afectado el sistema de la red de distribución por los automóviles eléctricos, todo esto con los datos obtenidos de la red y medidas de tendencia central para los datos proyectados. Analizando las consecuencias de los automóviles eléctricos en la red de distribución utilizando flujos de carga.

Tabla VII. **Descripción de la fase 2**

Núm.	Acción	Descripción
1	Analizar curvas de carga	Obtener e interpretar la curva actual de los usuarios de la ciudad de Guatemala.
2	Determinar valor de energía	Establecer el incremento en la demanda por electromovilidad.
3	Añadir carga extra	A la carga actual incrementar los valores de la energía necesaria para electromovilidad.
4	Nueva curva de carga	Con la incorporación de electromovilidad se plantea la probable curva de carga.
5	Características técnicas de la red	Con base al equipo instalado en la actualidad se determina si es probable que soporten el nuevo nivel de carga.
6	Armónicos	Con base a los valores promedio de distorsión armónica, se determina la afectación que tendría sobre la red.

Fuente: elaboración propia.

- 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 procederá a determinar en qué medida aumentará con la implantación de la electromovilidad en la ciudad de Guatemala, y si es posible el abastecimiento de esta energía por las centrales del país.

Tabla VIII. **Descripción de la fase 3**

Núm.	Acción	Descripción
1	Analizar demanda	Se analiza 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 agrega la requerida por electromovilidad.
3	Análisis de la matriz de generación	Con base a los nuevos requerimientos de energía se evalúa 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 plantea la nueva curva de demanda del SIN.

Fuente: elaboración propia.

- 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 los mismos, 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 IX. **Descripción de la fase 4**

Núm.	Acción	Descripción
1	Posibles puntos	De acuerdo a las características de la ciudad se plantean los posibles puntos donde se pueden colocar centros de recarga.
2	Instalación de infraestructura	De acuerdo a 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.

9.5. Resultados esperados

Los resultados que se esperan el estudio están planteados de acuerdo a los objetivos, enfocados en la matriz de generación, red de distribución y centros de recarga de los vehículos eléctricos.

Tabla X. **Resultados esperados**

Preguntas de investigación	Objetivo	Fases	Resultados esperados
¿Existen las condiciones eléctricas necesarias para la implementación de electromovilidad en la ciudad de Guatemala?	Determinar si existen las condiciones necesarias para la implementación de electromovilidad en la ciudad de Guatemala.	Revisión documental.	Haber establecido la demanda que será abastecida derivado de la implementación de electromovilidad.
¿Cómo impacta la implementación de electromovilidad a la red de distribución?	Determinar el impacto en la red de distribución causado por la implementación de electromovilidad.	Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar el impacto en la red de distribución.	Haber determinado de acuerdo a la capacidad instalada y a las condiciones actuales en qué medida la red de distribución se ve afectada por los automóviles eléctricos.
¿Cómo impacta la implementación de electromovilidad a la matriz de generación?	Determinar el impacto en la matriz de generación causado por la implementación de electromovilidad.	Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar el impacto en la matriz de generación de energía eléctrica.	Haber determinado de acuerdo a la capacidad instalada y a las condiciones actuales en qué medida la matriz de generación energética, se ve afectada por los automóviles eléctricos.
¿Qué características de técnicas y operativas deberían contemplar los centros de recarga para electromovilidad?	Identificar las características técnicas y operativas que deberían tener los centros de recarga para electromovilidad.	Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para identificar las características de los centros de recarga.	Haber obtenido la cantidad de centros de recarga y los tipos de recargas a implementar, necesarios para abastecer la demanda de energía de los automóviles eléctricos.

Fuente: elaboración propia.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Durante el desarrollo del estudio de investigación se usarán técnicas de análisis de datos cuantitativos, análisis numéricos para el cálculo de la demanda estimada y estadística descriptiva, utilizando medidas de tendencia central. Iniciando por el cálculo estimado de consumo de energía de un automóvil promedio, y la cantidad que puede recorrer con esta energía, todo segmentado de acuerdo a las características de cada automóvil, a continuación, para el caso de los vehículos se utilizarán los valores promedio de penetración de mercado de cada tipo de vehículo, siendo totalmente eléctricos o híbridos, esto de acuerdo a la información de la revista *Global EV Outlook (International Energy Agency, 2019)*, así plantear el escenario de la tendencias a nivel mundial respecto a automóviles eléctricos, a continuación se describe el uso de la técnica para lograr cada uno de los objetivos planteados, y establecer a través de la los registros de las bases de datos públicas del Superintendencia de Administración Tributaria - SAT- la cantidad de vehículos registrados en la ciudad y determinar la cantidad de automóviles a la que corresponde el 25 % de total que será objeto del análisis. A través del siguiente procedimiento:

- Explorar los datos obtenidos en la recolección: se analizan los datos obtenidos, revisando su congruencia y utilidad.
- Analizar descriptivamente los datos por variable:

Tabla XI. **Análisis descriptivo de las variables**

Variable	Análisis descriptivo
Habitantes de la ciudad de Guatemala	Conocer las características de la población, a través de gráficos interpretar la información con distribución de frecuencias.
Parque automovilístico de la ciudad de Guatemala	Agrupar la cantidad de vehículos, motocicletas, autobuses, obtener distribución de frecuencias.
Automóviles eléctricos	A través de medidas de tendencia central, obtener las características de las tendencias a nivel mundial de la electromovilidad.
Características de la red de distribución	Con medidas de tendencia central determinar las características de la red de distribución, consumo de usuarios, cantidad de usuarios en la ciudad de Guatemala.
Composición de la matriz de generación	Con medidas de tendencia central determinar las características de la matriz de generación.
Combustible	Evaluar histórico de precios con estadística descriptiva.
Recorrido de los automóviles	Se adhiere el valor de los recorridos promedio por automóvil para determinar consumos promedios.

Fuente: elaboración propia.

- Visualizar los datos por variable: se grafican los datos con la capacidad para ser presentados, visualizados y analizados, específicamente a las variables: parque automovilístico de la ciudad de Guatemala, automóviles eléctricos, características de la red de distribución, y composición de la matriz de generación.
- Evaluar la confiabilidad, validez y objetividad de los instrumentos de medición utilizados: la confiabilidad se evaluará con el coeficiente del alfa

de Cronbach, utilizado en la variable de los automóviles eléctricos, donde se obtendrá el valor de consumo promedio de los vehículos, motocicletas, y autobuses eléctricos, de acuerdo a los modelos más vendidos en el mercado mundial. Aplicando estadística descriptiva, con medidas de tendencia central.

- Realizar análisis adicionales: revisar que los datos obtenidos tengan concordancia de acuerdo a estudios realizados en otros países.
- Preparar los resultados para presentarlos: agrupar los datos para poder ser presentados a través de gráficos con su respectiva interpretación.

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

- Obtener e interpretar la curva de carga de los usuarios de la ciudad de Guatemala.
- Establecer el incremento en la demanda por electromovilidad.
- A la carga actual incrementar los valores de la energía necesaria para electromovilidad.
- Con la incorporación de electromovilidad se plantea la nueva curva de carga.
- Con base al equipo instalado en la actualidad se determina si es probable que soporten el nuevo nivel de carga.

- Usando software adecuado determinar a través de flujos de carga como se comportaría la red de distribución con el aumento en la demanda de energía eléctrica.
- Con base a los valores promedio de distorsión armónica, se determina la afectación que tendría sobre la red.

Toda la información utilizada será en base a datos promedio debido a que el comportamiento de demanda es diferente para cada usuario.

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

- Se analiza la demanda del último año, tomando en cuenta, máximos y mínimos, estacionalidad de la generación.
- A la energía demanda se le agrega la requerida por electromovilidad.
- Con base a los nuevos requerimientos de energía se evalúa si se posee la capacidad de suministrarla, tomando en cuenta diferencias en las transacciones.
- Con base en análisis previos se plantea la nueva curva de demanda del SIN.

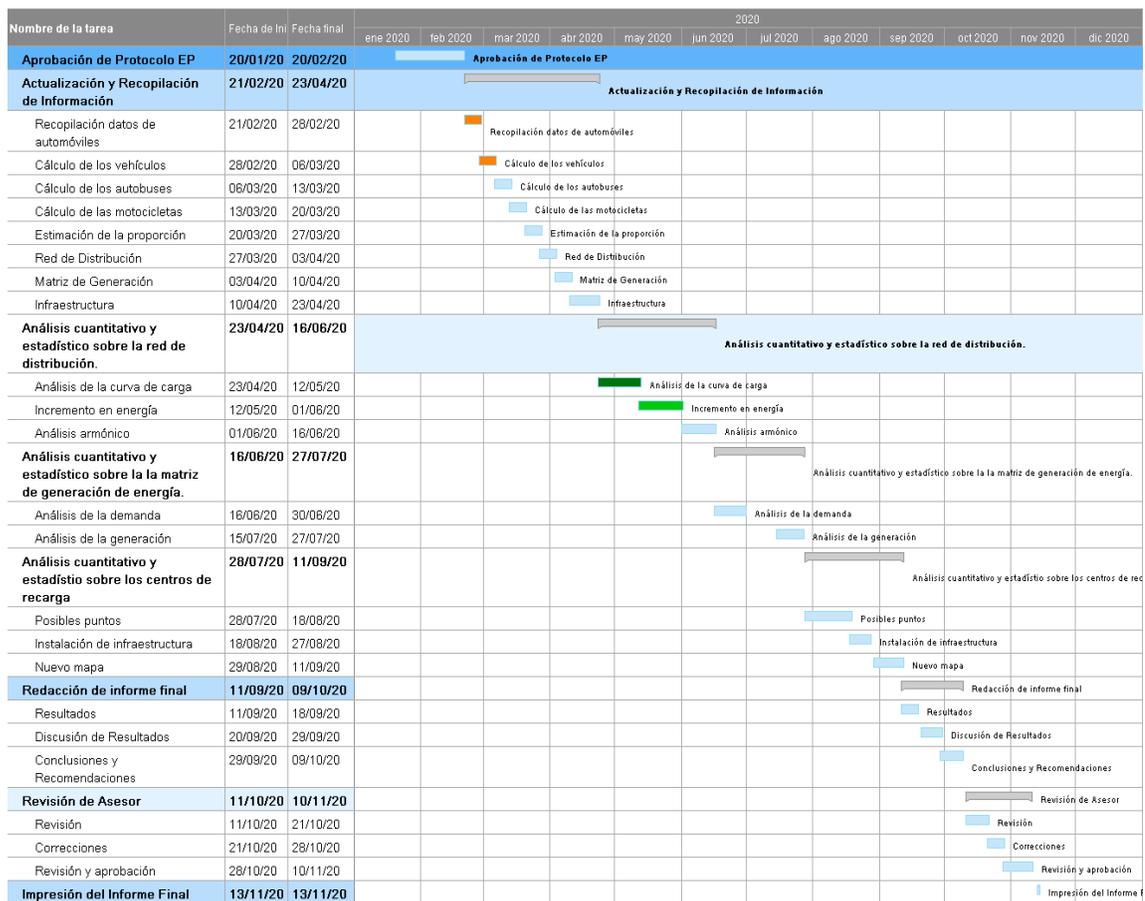
Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para Identificar las características de los centros de recarga.

- De acuerdo a las características de la ciudad se plantean los posibles puntos donde se pueden colocar centros de recarga.
- De acuerdo a los tipos de recargas (en el hogar, en la vía pública, y en estaciones de recarga) se analiza la posibilidad y viabilidad de instalarlos en la ciudad de Guatemala.
- Se colocan imágenes del mapa de la ciudad con la adhesión de los posibles puntos de recarga.

11. CRONOGRAMA

A continuación, se muestra la propuesta de cronograma de actividades a realizar con el trabajo de investigación:

Figura 18. Cronograma de actividades a desarrollar



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El trabajo de investigación es factible debido a que se cuentan con todos los recursos necesarios para la realización del mismo con financiamiento propio.

Tabla XII. **Recursos a utilizar**

Descripción	Costo	Cantidad	Total
Movilización	Q 60.00	22	Q 1,320.00
Honorarios del estudiante	Q 3,500.00	1	Q 3,500.00
Honorarios del asesor	Q 3,000.00	1	Q 3,000.00
Computadora	Q 5,000.00	1	Q 5,000.00
Internet	Q 300.00	6	Q 1,800.00
Impresora	Q 500.00	1	Q 500.00
Energía eléctrica	Q 1.34	175	Q 235.25
Hojas	Q 10.00	8	Q 80.00
Material escolar	Q 50.00	1	Q 50.00
Total			Q 15,485.25
Imprevistos			Q 774.26
Costo Total			Q 16,259.52

Fuente: elaboración propia.

- Recursos humanos: se cuenta con el recurso humano necesario estando este conformado por el estudiante de la maestría en gestión de mercados eléctricos regulados y colaboración con el asesor.
- Recursos financieros: a continuación, se muestra el desglose de los gastos proyectados en los que se incurrirán, mostrando que todos pueden ser cubiertos por el estudiante.
- Recursos tecnológicos: los recursos tecnológicos y herramientas utilizadas están contenidas dentro de los paquetes de office de la computadora del estudiante, así como internet, y el software para el análisis del flujo de carga es de libre acceso para estudiantes.
- Acceso a información: la información utilizada para el desarrollo del trabajo de investigación está conformada por información de acceso público, bases de datos del Administrador del Mercado Mayorista, Superintendencia de Administración Tributaria, Entidad Metropolitana Reguladora de Transporte y Tránsito y la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, así como todas las referencias para el desarrollo del marco teórico.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB Group. (2005). *Transformadores de distribución y potencia*. Recuperado de <http://www.interelectricas.com.co>
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.

8. Bohórquez, J., Díez, I., López, C., y Díez, A. (Julio-Diciembre de 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/articulo/view/909>
9. C40 Cities Finance Facility . (2018). *Análisis de tecnologías alternativas para buses*. México.
10. Castaño, N., y Franco, C. (2011). *Formulación de políticas para la penetración de las Smart Grid en Colombia*. Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario , 9° Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas , Bogotá.
11. Cecati, C., Morkryani, G., Pícolo, A., y Siano, P. (2010). An overview on the smart grid concept. *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 3322-3327. Glendale, Estados Unidos.
12. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (7 de Abril de 1999). *Resolución CNEE 09-99. Normas técnicas del servicio de distribución*. Guatemala.
13. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (Octubre de 1999). *Resolución CNEE-47-99. Normas técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución*. Guatemala
14. De la Herrán, J. (2014). *El auto eléctrico, una solución apremiante*. *Ciencia de boleto*. México.

15. 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
16. Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 18-28. Estados Unidos.
17. Fraile, J. (2003). *Máquinas eléctricas*. (C. Fernández Madrid, Ed.) Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España.
18. García, M. (2015). *Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
19. 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.
20. Gobierno de Chile. (2018). *Buenas prácticas en movilidad eléctrica*. (M. d. Energía, Ed.) Santiago de Chile.
21. Gobierno de Colombia. (1999). *Energías renovables: descripción tecnologías y usos finales*. Recuperado de <https://www1.upme.gov.co/>.
22. *Decreto No. 93-96. Ley general de electricidad*. Diario de Centro América. Guatemala, 15 de noviembre de 1996.

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 D.C.
25. Hoarau, Q., y Perez, Y. (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.
27. International Energy Agency. (2019). *Global EV Outlook 2018*. Recuperado de <https://webstore.iea.org/global-ev-outlook-2018>.
28. Ionut, C. (2017). *Fotolíneas*. Universidad Jaime, Castellón, España.
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.
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.
33. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Energía y Potencia Para Guatemala, los estadios del subsector eléctrico 1883-2017*. Guatemala. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/>
34. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Política Energética 2019-2050*. Guatemala. 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.
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.
39. Piolet, F. (2012). Conocer los armónicos de las instalaciones eléctricas. *Industria al día*(95), 64-65.
40. Ramirez, S. (2004). *Redes de distribución de energía (Vol. III)*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
41. RTR Energía S.L. (2012). *Los armónicos y la calidad de la energía eléctrica*. España.
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.
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.
45. Vallejo, J. (2017). *Situación de la ciudad de Medellín en cuanto a la capacidad que tiene en infraestructura de electrolíneas 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.
47. Zumbado, M. (2015). Autos eléctricos. *Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica*, 1(1) 1-6.