



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS A CONSIDERAR EN LA INCORPORACIÓN  
MASIVA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO AL SISTEMA NACIONAL  
INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

**Ing. Esvin Rafael Avila Pernillo**

Asesorado por el Mtro. Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordoñez

Guatemala, octubre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS A CONSIDERAR EN LA INCORPORACIÓN  
MASIVA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO AL SISTEMA NACIONAL  
INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. ESVIN RAFAEL AVILA PERNILLO**

ASESORADO POR EL MTRO. ING. CARLOS ALEJANDRO ALEGRE  
ORDOÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA DE TESIS**

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Máynor Godoy Arias
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez.

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS A CONSIDERAR EN LA INCORPORACIÓN MASIVA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 20 de julio de 2020.

**Ing. Esvin Rafael Avila Pernillo**



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

**Decanato**  
**Facultad de Ingeniería**  
**24189101 - 24189102**

DTG. 506.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS A CONSIDERAR EN LA INCORPORACIÓN MASIVA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por el Ingeniero Esvin Rafael Avila Pernillo, estudiante del programa de **Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, octubre de 2021

AACE/cc



**Guatemala, octubre de 2021**

LNG.EEP.OI.025.2021

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

**“ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS A CONSIDERAR EN LA INCORPORACIÓN MASIVA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA”**

presentado por **Esvin Rafael Avila Pernillo** quien se identifica con carné **200819002** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

  
**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director



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



Guatemala, 07 de mayo de 2021.

**M.Sc. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Presente

**M.Sc. Ingeniero Álvarez Cotí:**

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** del trabajo de graduación titulado: **“ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS A CONSIDERAR EN LA INCORPORACIÓN MASIVA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA”** del estudiante **Esvin Rafael Avila Pernillo** quien se identifica con número de carné **200819002** del programa de **Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados**.

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

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

Atentamente,

**M.Sc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque**  
Coordinador  
Área de Desarrollo Socio Ambiental y Energético  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería USAC



Guatemala, 21 de octubre de 2020

**Ingeniero Mtro.  
Edgar Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería USAC  
Ciudad Universitaria, Zona 12**

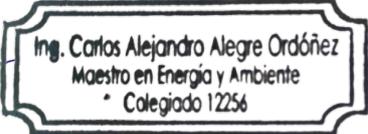
**Distinguido Ingeniero Álvarez:**

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación del estudiante Esvin Rafael Avila Pernillo, carné número 2008 19002, cuyo título es '**ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS A CONSIDERAR EN LA INCORPORACIÓN MASIVA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**', para optar al grado académico de Maestro en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Avila Pernillo, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

  
  
**Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez**  
Mtro. Energía y Ambiente  
Asesor

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser el Padre bueno y guiarme en los pasos de la vida.
<b>Mis padres</b>	Andrés Avila y Vitalina Pernillo, por su apoyo incondicional a pesar de las penas y dificultades.
<b>Mi esposa</b>	Aracely Micán, por ser mi compañera de vida.
<b>Mis hijos</b>	Madelyn y Saqb'e Avila Micán, por ser mi fuente de inspiración.
<b>Mis hermanos</b>	Para que este logro sirva de ejemplo de vida en cada una de las metas que se propongan.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser el <i>Alma Mater</i> y la casa de estudios de me vio crecer humana y profesionalmente.
<b>Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería</b>	Por el apoyo recibido durante el desarrollo de esta maestría.
<b>Carlos Alegre</b>	Por su valiosa colaboración y asesoría en la elaboración de este trabajo de graduación.
<b>Grupo de maestría</b>	Byron Quelex, Dennys Carmajá, Edson Raymundo y Mauro Santizo; por su valiosa amistad, compañerismo y el acompañamiento durante este tiempo de formación personal y profesional.



2.2.2.1.	Vehículo híbrido configuración en serie.....	19
2.2.2.2.	Vehículo híbrido configuración en paralelo.....	20
2.2.2.3.	Vehículo híbrido configuración mixta ...	20
2.2.3.	Tecnología de baterías y sistemas de recarga .....	21
2.2.3.1.	Tipos de baterías.....	22
2.2.4.	Tipos de recarga de vehículos eléctricos .....	23
2.2.4.1.	Recarga convencional.....	23
2.2.4.2.	Recarga semirápida .....	23
2.2.4.3.	Recarga rápida.....	24
2.3.	Curva de carga o demanda .....	24
2.3.1.	Definición .....	24
2.4.	Legislación guatemalteca que regula el uso de vehículos eléctricos.....	28
2.4.1.	Necesidad de definir una normativa asociada a la incorporación de vehículos electricos en Guatemala .....	29
2.4.2.	Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico de Costa Rica.....	29
2.4.3.	Normativa Internacional.....	30
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	33
3.1.	Tipo y diseño de la investigación.....	33
3.1.1.	Alcance de la investigación .....	34
3.1.2.	Unidad de análisis .....	34
3.1.3.	Variables e indicadores .....	35
3.2.	Revisión documental .....	35

3.3.	Identificación de la demanda derivada del uso masivo de vehículos eléctricos.....	37
3.3.1.	Escenario de penetración masiva de vehículos eléctricos.....	39
3.3.2.	Definición de escenario .....	39
3.3.3.	Cálculo aproximado de la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos.....	40
3.4.	Impacto al Sistema Nacional Interconectado con el uso masivo de vehículos eléctricos .....	40
3.5.	Incentivos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala.....	42
3.6.	Técnicas estadísticas de análisis de información.....	43
3.6.1.	Tolerancia de los resultados obtenidos .....	43
3.6.2.	Métodos de análisis de datos .....	44
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	45
4.1.	Cálculo aproximado de la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos.....	45
4.2.	Impacto al sistema nacional interconectado con el uso de vehículos eléctricos.....	51
4.3.	Incentivos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala.....	58
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	61
5.1.	Cálculo aproximado de la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos.....	62
5.2.	Impacto al sistema nacional interconectado con el uso de vehículos eléctricos.....	64

5.3.	Incentivos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala .....	66
	CONCLUSIONES.....	69
	RECOMENDACIONES .....	71
	REFERENCIAS .....	73





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Participación de sectores sobre el consumo final de energía 1970-2015 .....	9
2.	Resumen de parque de vehículos.....	12
3.	Energía demandada por un vehículo híbrido en sus diferentes etapas.....	18
4.	Configuración de tecnologías de los diferentes tipos de vehículos eléctricos.....	21
5.	Representación gráfica de una “Curva de demanda diaria” hipotética, con acercamiento al entorno del valor demanda máxima.....	25
6.	Proyección de vehículos activos con motor eléctrico en Guatemala....	37
7.	Tolerancias de convergencia.....	43
8.	Curva de demanda máxima histórica para el SNI registrada el día 16 de mayo de 2019 comparada con la curva de demanda máxima proyectada con el uso masivo de vehículos eléctricos .....	53
9.	POE día de potencia máxima histórica registrada del SNI (16.05.2019) comparado con el día de potencia máxima con el uso de Vehículos eléctricos.....	57

### TABLAS

I.	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, sector energía 2013-2017, en millones de toneladas de CO <sub>2</sub> e .....	11
II.	Resumen de parque de vehículos por departamento .....	13

III.	Resumen de parque de vehículos por tipo.....	14
IV.	Características de distintas tecnologías de baterías para vehículos eléctricos.....	22
V.	Variables e indicadores .....	35
VI.	Proyección de parque vehicular de Guatemala para el año 2030 .....	45
VII.	Unidad de análisis proyectada de vehículos eléctricos.....	46
VIII.	Cálculo de la demanda horaria requerida por los vehículos eléctricos.....	47
IX.	Carga horaria requerida por los EV's de 00:00 a 8:00.....	48
X.	Carga horaria requerida por los EV's de 08:01 a 16:00.....	49
XI.	Carga horaria requerida por los EV's de 16:01 a 24:00.....	50
XII.	Demanda local con vehículos eléctricos comparada con la demanda local sin vehículos eléctricos (Demanda máxima histórica _ 16.05.2020).....	52
XIII.	Precio de oportunidad de la energía previsto con el uso de vehículos eléctricos.....	55
XIV.	Precio de oportunidad de la energía 16 de mayo de 2019 .....	56
XV.	Incentivos mínimos para la importación y promoción del transporte eléctrico.....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperios
<b>I</b>	Corriente eléctrica
<b>E</b>	Energía
<b>GWh</b>	Gigavatio por hora
<b>Hz</b>	Hertz
<b><math>\Delta t</math></b>	Intervalo de tiempo
<b>kV</b>	Kilo voltios
<b>MW</b>	Megavatios
<b>MWh</b>	Megavatio por hora
<b><math>\Omega</math></b>	Ohmio
<b>R</b>	Resistencia eléctrica
<b>s</b>	Segundos
<b><i>t</i></b>	Tiempo
<b>V</b>	Voltaje



## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista.
<b>BEV</b>	Vehículo eléctrico a baterías.
<b>CA</b>	Corriente Alterna.
<b>CC</b>	Corriente Continua.
<b>CCD</b>	Curva de Carga Diaria.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
<b>Curva de carga</b>	La sucesión de valores de demanda como función del tiempo.
<b>DRE</b>	Energía renovable distribuida.
<b>EV</b>	Vehículo eléctrico.
<b>Flujo de potencia</b>	Cantidad de potencia activa y reactiva que recorre un circuito eléctrico.
<b>HEV</b>	Vehículo eléctrico híbrido.

<b>ICARE</b>	Instituto Chileno de Administración Racional de Empresas.
<b>IVA</b>	Impuesto al Valor Agregado.
<b>MER</b>	Mercado Eléctrico Regional.
<b>Ni-MH</b>	Níquel-hidruro metálico.
<b>PCD</b>	Perfil de Carga Diario.
<b>Perfil de carga</b>	Representación gráfica de la curva de carga en función del tiempo.
<b>PHEV</b>	Vehículo eléctrico enchufable.
<b>POE</b>	Precio de oportunidad de la Energía.
<b>SAT</b>	Superintendencia de Administración Tributaria
<b>SER</b>	Sistema Eléctrico Regional.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado.

## RESUMEN

En esta investigación se desarrolló un análisis sobre los aspectos técnicos y regulatorios que tendría el uso masivo de vehículos eléctricos en Guatemala, así como su impacto sobre el Sistema Nacional Interconectado (SNI). Además, se determinaron los incentivos mínimos que promuevan la importación, comercialización y uso de vehículos eléctricos en Guatemala.

Se proyectó un modelo de crecimiento de vehículos eléctricos (EV's) y se estimó el consumo promedio para cada vehículo, sumando estos valores de consumo a la demanda máxima histórica del SNI. Cuando se realizó este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019 de acuerdo con los programas de despacho diario publicados por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM), se utilizaron tablas de recolección de datos del parque de vehículos convencionales que se obtuvieron de la página de la SAT.

Entre los principales impactos al SNI se identificó, con base en los cálculos que la demanda máxima requerida por el uso masivo de los EV's será de 157.4 Megawatts (MW) y que la demanda máxima que registrará el SNI será de 1744.5 MW. En tal sentido, la capacidad instalada del SNI es de 3,405.3 MW de acuerdo con la base de datos del AMM. En ese sentido se tiene una diferencia de 1660.8 MW disponibles; se tiene que la capacidad instalada que tiene el SNI no refleja la capacidad disponible para el despacho de generación. Hay centrales que quedan fuera del despacho de generación por indisponibilidades, mantenimientos, salidas forzadas, falta de combustible y por despacho económico.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de vehículos eléctricos es una tendencia mundial. Derivado de los altos niveles de contaminación que tiene el planeta en los países industrializados el uso de vehículos convencionales se está reduciendo considerablemente. En Guatemala el uso de vehículos convencionales va en aumento y esto provoca altos niveles de contaminación en la ciudad capital y en las principales ciudades del país.

Como consecuencia, empresas internacionales ya han ingresado al país con vehículos no convencionales o vehículos eléctricos, pero en Guatemala no existe una ley que incentive la importación de vehículos eléctricos.

Por esta razón, se prevé un crecimiento del parque vehicular eléctrico. Esto implica retos, por ejemplo, el impacto que tendrá el SNI por el uso masivo de vehículos eléctricos. El aumento en el uso de vehículos eléctricos en el mundo y en Guatemala genera la necesidad de analizar el impacto al Sistema Nacional Interconectado con la implementación masiva de vehículos eléctricos y la carga demandada del uso de los vehículos eléctricos en la República de Guatemala.

La adopción de EV en Guatemala no trae riesgos para la distribución, transmisión y generación de la red eléctrica del país. Por el contrario, su masificación permitiría desplazar el consumo de combustibles líquidos importados hacia el consumo de electricidad de producción nacional. Además, se identifica como una oportunidad de negocio para las generadoras dispuestas a aprovechar su capacidad instalada disponible en horario valle. (Anaya, 2018, p. 8)

- Preguntas de investigación
  - Pregunta central
    - ¿Cuáles serán los aspectos técnicos y regulatorios que tendrá el uso masivo de vehículos eléctricos y cuál será el impacto al sistema nacional interconectado de Guatemala?
  - Preguntas auxiliares
    - ¿Cuál será la demanda derivada del uso masivo de vehículos eléctricos?
    - ¿Tendrá un fuerte impacto el sistema nacional interconectado al implementar de forma masiva vehículos eléctricos?
    - ¿Qué alentaría el interés de inversionistas y empresas dedicadas a la importación y venta de vehículos eléctricos hacia el mercado guatemalteco?

## OBJETIVOS

- General
  - Determinar los aspectos técnicos y regulatorios a considerar con la incorporación masiva de vehículos eléctricos y su impacto al sistema nacional interconectado de Guatemala.
  
- Específicos
  - Identificar la demanda derivada del uso masivo de vehículos eléctricos.
  - Estimar el impacto al sistema nacional interconectado al implementar de forma masiva vehículos eléctricos.
  - Determinar los incentivos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala.



## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación tuvo un alcance de tipo exploratorio porque actualmente no hay alguna normativa o ley vigente que regule o incentive el uso de vehículos eléctricos en Guatemala. El diseño de esta investigación fue no experimental ya que el investigador no tuvo control sobre las variables. El enfoque del estudio fue mixto, teniendo un primer enfoque cuantitativo ya que se determinó el crecimiento del parque de vehículos eléctricos basado en el parque de vehículos convencionales, utilizando estos valores para identificar la carga requerida por el uso masivo de EV's y un segundo enfoque cualitativo porque con base en otras leyes implementadas en países con similitudes a Guatemala se determinaron los incentivos necesarios para la importación de EV's en el país.

La unidad de análisis fue el mercado de vehículos de transporte de Guatemala, esta unidad de análisis se tomó como base de estudio para proyectar el mercado de EV's, con un número aproximado de EV's se identificó la carga requerida por ellos y se estimó el consumo promedio sumando estos valores a la demanda máxima histórica del SNI, al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019.

- Fases del estudio
  - Fase 1. Identificación de la demanda derivada del uso masivo de EV's: en esta fase se utilizaron las técnicas de investigación de “observación” y “tendencia”, ya que se proyectó un modelo de crecimiento de vehículos eléctricos.

Con el apoyo de la herramienta NCP se realizó la simulación de la programación de operación a corto plazo para un día de demanda máxima que contemple la demanda requerida por el uso de EV's. Para la verificación de las técnicas estadísticas de análisis de información la herramienta NCP presentó la opción de definir las diferentes tolerancias de convergencia de los resultados obtenidos.

- Fase 2. Impacto al SNI: basado en la demanda producida por el uso masivo de EV's, se determinó el impacto que esto tendrá sobre el SIN, se analizó la curva de demanda, el análisis de despacho de generación, la comparación del POE y se identificó si la oferta instalada de generación será capaz de satisfacer la demanda producida con el uso de vehículos eléctricos.
- Fase 3. Determinación de incentivos para la importación de EV's en Guatemala: en esta fase de la investigación se utilizó la técnica de investigación documental, se realizó una recopilación de leyes implementadas en países en los cuales ya se haya implementado el uso de EV's.

## INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país en vías de desarrollo, este desarrollo va acompañado de un crecimiento del parque de vehículos convencionales, los que, a su vez, provocan aproximadamente la mitad de los gases de efecto invernadero que se producen en el país. Actualmente, en el mundo se está dando un alto crecimiento del uso de nuevas tecnologías para el transporte, estas tecnologías basadas en sistemas eléctricos tienen amplios beneficios específicamente sobre el medio ambiente y el desarrollo de un país.

El uso de vehículos eléctricos en Guatemala representa grandes dificultades y obstáculos por superar, entre los cuales se puede mencionar que en el país no existe una ley que incentive la importación de vehículos eléctricos.

Gracias a los recursos renovables disponibles en el país existe una alternativa real de implementar el uso masivo de vehículos eléctricos, al implementar la movilidad eléctrica se aprovecharía al máximo los recursos renovables disponibles y con ello se avanzaría a un país más sostenible energéticamente y con menos contaminación ambiental.

La investigación se divide en cinco capítulos los cuales se resumen a continuación.

En el capítulo número uno se desarrolla el marco referencial en el cual se describen los principales antecedentes relativos al uso de vehículos eléctricos en Guatemala, como para países en los cuales ya se está implementando el uso de vehículos eléctricos.

En el capítulo número dos se desarrolla el marco teórico de esta investigación en el cual se definen conceptos tales como: vehículo eléctrico, tipo de baterías, tipos de recarga, definición de curva de demanda, Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico de Costa Rica, entre otros.

En el capítulo número tres se tiene el desarrollo de la investigación, en el cual se describe el tipo y diseño de la investigación, se define el alcance de la investigación, se desarrollan las fases de la investigación de acuerdo con el objetivo general y a los objetivos específicos planteados, entre los cuales se puede mencionar: identificación de la demanda derivada del uso masivo de vehículos eléctricos, impactos al SNI y los incentivos mínimos para la importación y uso de vehículos eléctricos en Guatemala.

En el capítulo número cuatro se presentan de resultados, en el cual se presenta el cálculo de la carga requerida por la carga de vehículos eléctricos, se estimaron los principales impactos al SNI con el uso masivo de vehículos eléctricos y se presentan los incentivos mínimos para la importación de vehículos eléctricos.

En el capítulo número cinco se incluye la discusión de resultados, se analiza el comportamiento de la carga horaria requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos, así como los impactos que esta demanda tendría sobre el SNI entre los cuales se menciona el impacto a la demanda, capacidad instalada, comparación del Precio de Oportunidad de la Energía (POE), adicionalmente se analizan los incentivos mínimos requeridos para la importación, comercialización y uso de vehículos eléctricos en Guatemala.

El objetivo primordial de esta investigación es sentar un precedente relacionado con la movilidad eléctrica, incentivar a las empresas de importación

de vehículos eléctricos y que esta investigación sirva de base para el encaminamiento de Guatemala como nación hacia un futuro con fuentes de transporte eficientes, renovables y libres de contaminación hacia el medio ambiente.



## 1. MARCO REFERENCIAL

“El parque vehicular de Guatemala creció de manera significativa en la última década. Este crecimiento representa un aumento de la dependencia de combustibles fósiles y de las emisiones de gases de efecto invernadero” (Anaya, 2018, p. 10).

La introducción de vehículos eléctricos en el parque vehicular de Guatemala se evalúa como medida para reducir la dependencia energética, mitigar el volumen de emisiones de CO<sub>2</sub> y planificar el crecimiento de la demanda de electricidad. No obstante, el nuevo mercado requiere superar barreras de apertura y establecer un arreglo institucional a cargo de su regulación y monitoreo. (Anaya, 2018, p. 10)

De acuerdo con Anaya (2018), la introducción de los vehículos eléctricos en Guatemala enfrenta importantes retos de entrada. Para superar estos retos, se recomienda implementar el mapa institucional y seguir la hoja de ruta planteada con base en tres líneas directrices: (i) Determinar/actualizar el valor agregado producto de introducir los EV y su infraestructura; (ii) Establecer políticas, regulaciones y negociaciones para el mercado de EV y la gestión energética y (iii) Gestionar y apoyar el uso de EV y la ampliación de su infraestructura de recarga y de servicios. La primera directriz consiste en la valoración del mercado e identificación de los obstáculos para la apertura del mercado y necesidades de los usuarios potenciales de los vehículos. (p. 12).

La segunda directriz, considera elaborar un marco regulatorio y normativo para la instalación, funcionamiento y monitoreo de la infraestructura de recarga de baterías. Por último, la tercera directriz busca promover la adopción generalizada de los vehículos eléctricos, así como ampliar la infraestructura de recarga disponible. (Anaya, 2018, p. 7).

La adopción de EV en Guatemala no trae riesgos para la distribución, transmisión y generación de la red eléctrica del país. Por el contrario, su masificación permitiría desplazar el consumo de combustibles líquidos importados hacia el consumo de electricidad de producción nacional. Además, se identifica como una oportunidad de negocio para las generadoras dispuestas a aprovechar su capacidad instalada disponible en horario valle. (Anaya, 2018, p. 8).

El aumento en la contaminación ambiental, el precio del petróleo y la escasez de reservas para suplir la demanda futura, han hecho que el hombre busque nuevas alternativas de combustible para moverse. Dentro de las múltiples posibilidades, se encuentran los vehículos eléctricos como una de las opciones más prometedoras. Países como Noruega, Francia, Alemania, Estados Unidos y España han incrementado el número de vehículos eléctricos (EV's) en los últimos años. Actualmente, en Bogotá D.C. se adelantan varias pruebas piloto de EV's y se trabaja en la creación de incentivos y leyes que permitan dar viabilidad a la masificación de tecnología en la ciudad. (Morales Quintana, 2014, p. 5).

En la ciudad de Bogotá se plantea una metodología para estimar la energía eléctrica requerida por los vehículos eléctricos, teniendo en cuenta los hábitos de conducción y estadísticas de movilidad de los vehículos particulares. Inicialmente se construye la función de probabilidad de las distancias acumuladas que recorre el vehículo eléctrico en un día de operación normal a partir de los patrones de movilidad (distancias recorridas, número de desplazamientos, etc.). Con la información obtenida se generan distribuciones de probabilidad para las distancias recorridas por los vehículos y para la energía requerida por un vehículo luego de un día de recorrido normal. (Mendoza, C.C., Quintero, A.M., Santamaria, F., Alarcón, J.A., 2016, p.1).

Con las funciones obtenidas se determina la energía requerida por un vehículo, que es una información indispensable para evaluar el efecto de la conexión masiva de estos en la red eléctrica. De esta manera, bajo la metodología propuesta se provee una herramienta que permite predecir la cantidad de energía requerida por un determinado número de vehículos eléctricos que se conectan a la red. Finalmente, la metodología propuesta se valida en Bogotá, Colombia determinando la distribución de probabilidad que representa la energía consumida por vehículo. (Mendoza et al., 2016, p.1).

Impulsado por el auge del mercado de vehículos eléctricos (EV's), el costo de la batería de iones de litio observa una disminución notable que podría mejorar significativamente la capacidad de los EV's en la coordinación con la generación de energía a partir de energía renovable distribuida (DRE). Este documento se da cuenta de que existen diferentes estrategias de coordinación EV-DRE, mientras que los costos y la infraestructura asociada de estas estrategias difieren significativamente. Por lo tanto, es importante una evaluación económica que compare estas estrategias de coordinación. En este estudio, se realiza una evaluación económica entre cuatro estrategias de coordinación EV-DRE. Se encuentra que el costo del suministro de energía desde el lado de la demanda PV más los sistemas de almacenamiento podría ser más bajo que el del suministro de la red eléctrica antes de 2025. Este documento también identifica las barreras clave que enfrentan los vehículos eléctricos y el almacenamiento distribuido para participar en el mercado mayorista de electricidad actual en China y proporciona recomendaciones de política en términos de tarifas de tiempo de uso de electricidad (TOU), umbrales de mercado y problemas de medición. (Jian Liu, Caifu Zhong, 2019, p.1).

Según el sitio Web de ICARE (2019), en relación con la electromovilidad, mencionó que la venta de vehículos eléctricos ha ido creciendo en el último tiempo. Esto se concentra básicamente en China, Estados Unidos y Europa. La razón que lo explica es porque tienen subsidios directos que equiparan el precio con el vehículo a combustión interna. ( p.1).

“En Chile todavía es incipiente, pero ha habido pasos importantes. En 2018 se vendieron 197 vehículos eléctricos livianos, sobre unas ventas totales de vehículos livianos de 420 mil” (ICARE, 2019, p.1).

De acuerdo con ICARE (2019), de aquí al 2035:

Hay ciertos factores que van a influir en que la penetración de la electromovilidad sea más rápida o lenta: los avances tecnológicos, las regulaciones y el precio de la energía y de los combustibles líquidos (importante cuando uno evalúa el costo de tener un auto eléctrico versus uno a combustión interna).

Se estima que, en 2035, en Estados Unidos, alrededor del 40 % de las ventas totales de automóviles serán vehículos eléctricos. En Europa y China, en cambio, se espera que antes, en 2030, estas ventas representen un 30 %. ¿Y qué ocurrirá en Chile? (p.1).

“El crecimiento de este escenario para Chile se estima que será más lento y que se alcanzarán un 10 % en 2030” (ICARE, 2019, p.1).



## **2. MARCO TEÓRICO**

Como primer pilar de esta investigación se definirán los aspectos históricos y relevantes del parque de vehículos convencionales del país, se describirá la contaminación que estos vehículos convencionales provocan al medio ambiente, las estadísticas y crecimiento actual del parque de vehículos convencionales.

Adicionalmente, se definirán conceptos, como: vehículo eléctrico, tipo, tipo de baterías, concepto y definición de curva de demanda, detalles de la Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico de Costa Rica.

### **2.1. Aspectos históricos y relevantes del parque de vehículos convencionales en Guatemala**

De acuerdo con Anaya (2018), en los años 70:

El consumo del sector transporte representaba 11 % del CTE (consumo total de energía). En ese entonces el crecimiento del sector mostraba una baja tasa de crecimiento producto del alto porcentaje de población rural y escasa producción de combustibles. En esta misma década Guatemala sólo contaba con la refinería de Escuintla para procesar el petróleo crudo importado que abastecía 30 % del CTE el 70 % restante era abastecido por leña. La refinería suministraba 12 mbepd (miles de barriles equivalentes de petróleo por día), lo que representa el 86 % de los combustibles líquidos consumidos en Guatemala. (p. 13).

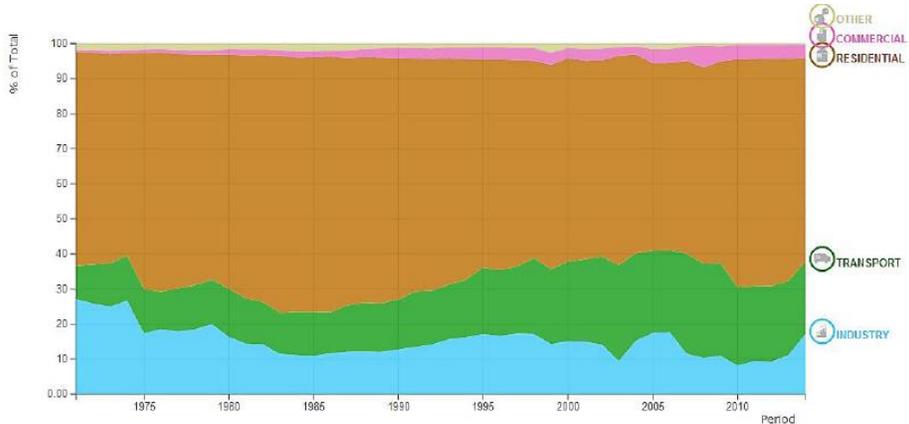
Durante el tiempo transcurrido entre 1984-1987, el consumo del sector transporte creció 50 % respecto al período anterior, alcanzando 9 mbepd. Se presume que este crecimiento fue resultado del descubrimiento del campo petrolero Xan. Por otra parte, la nueva Ley de Hidrocarburos de 1983 incentivó la exploración de nuevos yacimientos petroleros y orientó las importaciones hacia los combustibles líquidos. Al final del período, el sector transporte se convirtió en el segundo mayor consumidor de energía del país. (Anaya, 2018, p.13).

Entre 1999-2002 el país inició una rápida motorización. Las importaciones de vehículos superaban 40,000 unidades por año y mantenían una tasa de crecimiento interanual de 30 %. Para este período el consumo de energía del transporte creció 230 % -casi el doble del crecimiento experimentado por las industrias (126 %)-, ampliando el uso energético del sector a 29 mbepd y representando el 23 % del CTE. Ante la limitada capacidad de las refinadoras nacionales para hacer frente a la creciente demanda del parque vehicular, el país aumentó 326 % las importaciones de combustibles líquidos entre 1987 y 1999, contabilizando 43 mbepd. (Anaya, 2018, p.13).

Durante 2005 y 2008, la motorización del país continuó su crecimiento pasando de 780 mil a 1,4 millones de unidades. El sector transporte registró un consumo de 36 mbepd y 26 % del CTE, 24 % por encima del período anterior. Las importaciones de combustibles derivados del petróleo también crecieron en 60 %, totalizando 69 mbepd y abasteciendo cerca del 41 % del CTE. (Anaya, 2018, p.13).

“Desde entonces, el sector de transporte ha mantenido una participación cercana al 25 % del CTE. El gráfico a continuación presenta la tendencia observada en el consumo histórico de energía del sector transporte” (Anaya, 2018, p.13).

Figura 1. **Participación de sectores sobre el consumo final de energía 1970-2015**



Fuente: Anaya. (2018). *Vehículos eléctricos en Guatemala, Análisis de impacto y propuesta de implementación.*

### **2.1.1. Emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional**

El inventario de gases de efecto invernadero del sector energía fue integrado a los balances energéticos del MEM a partir del año 2016. El sistema de contabilización de emisiones fue desarrollado basado en metodologías existentes definidas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático -IPCC-. Los principales GEI contabilizados en este inventario sectorial son: el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Para contar con valores unificados, las emisiones de cada gas se estandarizan de acuerdo con su potencial de calentamiento global en un horizonte de tiempo definido con la intención de presentar los valores en unidades equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>e). (Unidad de Planeación Energético Minero, 2019, p. 38).

“Guatemala está ubicada dentro de los 10 países más vulnerables a daños ante los efectos del cambio climático, sin embargo, Guatemala no está ubicado dentro de los países que más producen gases de efecto invernadero” (Unidad de Planeación Energético Minero, 2019, p. 39).

De acuerdo con el informe de la Política Energética 2019-2050 de Guatemala: Monitorear las actividades energéticas que contribuyen a las emisiones de país, contribuyen a determinar estrategias de mitigación para un mejor aprovechamiento de los recursos renovables. Por lo que del año 2013 al 2016, se ha producido un crecimiento promedio de 9.8 % de las emisiones de GEI en el sector energía. Esto se debe principalmente al aumento de la demanda de energía a nivel nacional para todos los propósitos. (Unidad de Planeación Energético Minero, 2019, p. 39).

Tabla I. **Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, sector energía 2013-2017, en millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e**

<b>Emisiones de GEI Sector Energía</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Generación eléctrica	4.38	4.10	5.54	6.07	4.76
Refinación petrolera	0.11	0.13	0.13	0.13	0.15
Industria manufactura y construcción	1.25	1.83	2.00	2.05	2.33
Aviación	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Transporte terrestre	6.98	7.56	8.59	9.23	9.53
Consumo comercial/institucional	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
Consumo residencial	0.70	0.77	0.84	0.90	0.87
<b>Total</b>	<b>13.47</b>	<b>14.43</b>	<b>17.14</b>	<b>18.43</b>	<b>17.69</b>

Fuente: Unidad de Planeación Energético Minero. (2019). *Política Energética 2019-2050*.

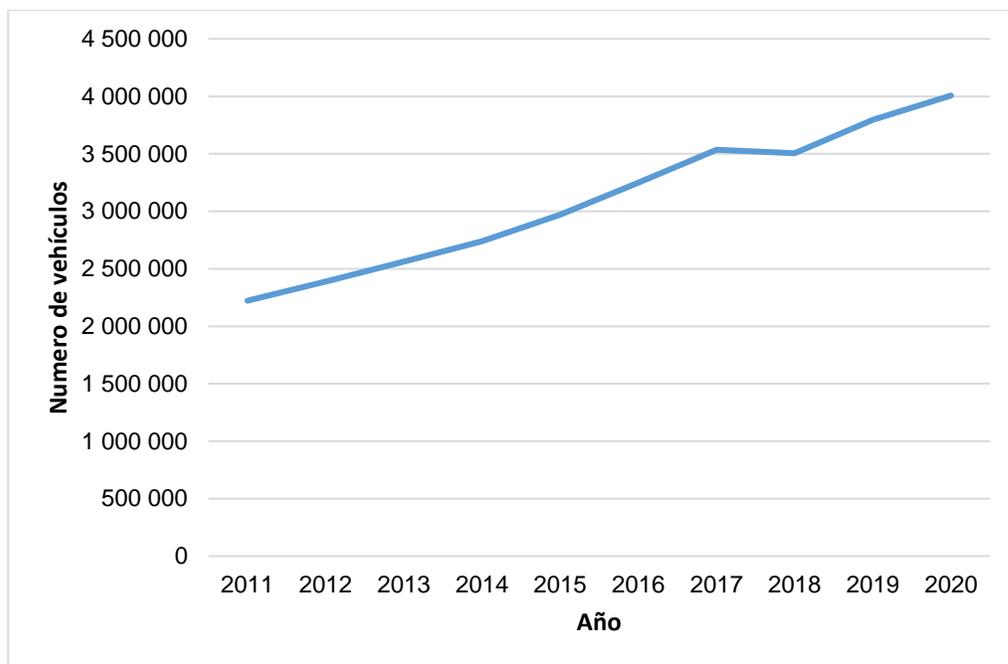
“Durante el año 2017 se produjeron 17.69 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e, de las cuales el 53.87 % corresponden al transporte terrestre y el 26.89 % corresponden a las actividades de generación eléctrica” (Unidad de Planeación Energético Minero, 2019, p. 39).

De acuerdo con el párrafo anterior es evidente que la mayor producción de gases de efecto invernadero proviene del sector transporte, es necesario para Guatemala como nación la implementación del uso de medios de transporte amigables con el medio ambiente, los vehículos eléctricos contribuirán enormemente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. (Anaya, 2018, pág. 15).

### 2.1.2. Caracterización del parque de vehículos convencionales

El parque vehicular de Guatemala, de acuerdo con el sistema de registro fiscal del país, alcanzó 4,006,883 unidades de vehículos al cierre de agosto de 2020.

Figura 2. Resumen de parque de vehículos



Fuente: Superintendencia de Administración tributaria, SAT. (2020). *Parque vehicular*. Consultado el 27 de Septiembre de 2020. Recuperado de <https://portal.sat.gob.gt/portal/parque-vehicular/>

De acuerdo con la figura 2, se tienen los siguientes datos: del año 2011 al 2020 el parque de vehículos convencionales de Guatemala ha crecido en un 80.31 %, presentando un crecimiento anual aproximado del 6.51 %.

A continuación, se presenta una tabla resumen con el parque vehicular por año en cada departamento del país.

**Tabla II. Resumen de parque de vehículos por departamento**

Departamento	Dic - 2011	Dic - 2012	Dic - 2013	Dic - 2014	Dic - 2015	Dic - 2016	Dic - 2017	Dic - 2018	Dic - 2019	Ago - 2020
<b>Total</b>	<b>2,222,182</b>	<b>2,389,240</b>	<b>2,562,925</b>	<b>2,738,925</b>	<b>2,970,678</b>	<b>3,250,194</b>	<b>3,535,682</b>	<b>3,504,405</b>	<b>3,795,178</b>	<b>4,006,883</b>
<b>Central</b>	<b>1,175,616</b>	<b>1,241,444</b>	<b>1,318,756</b>	<b>1,401,757</b>	<b>1,511,261</b>	<b>1,644,787</b>	<b>1,771,842</b>	<b>1,765,270</b>	<b>1,891,543</b>	<b>1,987,116</b>
Guatemala	1,055,939	1,110,913	1,176,512	1,247,657	1,340,682	1,454,051	1,559,885	1,547,112	1,649,790	1,730,352
Sacatepéquez	37,302	40,304	43,546	46,902	51,561	56,988	62,496	63,318	69,459	73,536
Chimaltenango	58,031	63,729	70,202	76,839	86,238	97,808	110,173	115,592	129,391	137,934
El Progreso	24,344	26,498	28,496	30,359	32,780	35,940	39,288	39,248	42,903	45,294
<b>Sur</b>	<b>346,443</b>	<b>380,844</b>	<b>414,142</b>	<b>446,357</b>	<b>487,946</b>	<b>536,203</b>	<b>586,636</b>	<b>569,227</b>	<b>615,252</b>	<b>650,886</b>
Escuintla	131,079	143,336	157,340	170,968	189,028	208,678	228,763	216,520	231,669	244,668
Retalhuleu	46,663	51,508	55,838	59,977	64,998	70,787	77,123	74,790	81,265	86,124
Suchitepéquez	54,878	61,265	66,995	72,458	79,404	87,308	95,544	91,749	100,148	107,049
Santa Rosa	48,011	53,056	57,122	61,131	66,305	72,873	79,698	79,393	86,008	90,728
Jutiapa	65,812	71,679	76,847	81,823	88,211	96,557	105,508	106,775	116,162	122,317
<b>Nororiente</b>	<b>299,396</b>	<b>334,506</b>	<b>368,143</b>	<b>398,084</b>	<b>435,244</b>	<b>477,486</b>	<b>523,449</b>	<b>506,697</b>	<b>557,460</b>	<b>595,708</b>
Izabal	61,025	68,048	74,983	81,376	88,586	97,011	106,214	100,372	110,297	117,753
Chiquimula	49,680	54,735	58,875	62,787	67,863	74,210	81,633	80,901	87,933	92,617
Zacapa	52,965	57,340	61,598	65,638	70,901	76,945	83,126	81,216	87,077	91,125
Alta Verapaz	30,229	33,960	37,646	41,058	45,608	50,604	56,181	55,631	64,694	72,315
Baja Verapaz	21,573	24,413	27,177	29,777	33,088	36,718	40,751	41,979	46,575	49,590
Petén	52,569	61,488	70,831	78,326	87,584	96,942	106,689	98,113	108,118	116,277
Jalapa	31,355	34,522	37,033	39,122	41,614	45,056	48,855	48,485	52,766	56,031
<b>Occidente</b>	<b>400,727</b>	<b>432,446</b>	<b>461,884</b>	<b>492,727</b>	<b>536,227</b>	<b>591,718</b>	<b>653,755</b>	<b>663,211</b>	<b>730,923</b>	<b>773,173</b>
San Marcos	93,329	102,017	109,271	117,001	127,721	140,954	156,815	157,031	172,633	181,601
Huehuetenango	70,985	76,537	81,719	87,342	94,783	104,754	116,966	119,088	134,409	143,928
Quetzaltenango	156,400	166,349	176,159	186,426	201,396	220,686	240,887	245,668	265,570	277,901
Totonicapán	25,506	27,282	28,895	30,666	33,155	36,474	39,976	41,004	44,549	46,638
Sololá	14,615	16,025	17,606	19,266	21,934	25,022	27,942	28,635	32,171	34,588
Quiché	39,892	44,236	48,234	52,026	57,238	63,828	71,169	71,785	81,591	88,517

Fuente: Superintendencia de Administración tributaria, SAT. (2020). *Parque vehicular*. Consultado el 27 de Septiembre de 2020. Recuperado de <https://portal.sat.gob.gt/portal/parque-vehicular/>

Tabla III. **Resumen de parque de vehículos por tipo**

Tipo de vehículo	Dic - 2012	Dic - 2014	Dic - 2016	Dic - 2018	Ago - 2020
<b>Total</b>	<b>2,389,240</b>	<b>2,738,925</b>	<b>3,250,194</b>	<b>3,504,405</b>	<b>4,006,883</b>
Autobuses, buses, microbuses	99,579	103,914	113,448	110,851	117,851
Automóviles	576,821	632,425	727,291	760,713	816,728
Camiones, cabezales y transporte de carga	131,738	139,665	153,443	154,006	168,719
Camionetas, camionetas y tipo panel	261,836	299,347	378,302	452,895	527,841
Carretas, carretones, remolques, etc.	6,411	8,369	9,615	10,264	10,795
Furgones y plataformas	20,144	23,538	26,649	27,107	28,768
Grúas	712	842	1,030	1,236	1,492
Jeep	20,700	20,987	21,283	20,459	21,200
Motocicletas	756,438	963,859	1,227,879	1,358,756	1,660,364
Pick-up	505,576	535,511	579,399	595,896	639,440
Tractores y mini tractores	996	1,011	1,009	794	837
Otros	8,289	9,457	10,846	11,428	12,848

Fuente: Superintendencia de Administración tributaria, SAT. (2020). *Parque vehicular*.

Consultado el 27 de Septiembre de 2020. Recuperado de <https://portal.sat.gob.gt/portal/parque-vehicular/>

De la tabla III se puede identificar que, al cierre de agosto de 2020, la cantidad existente de autobuses, buses y microbuses corresponde a 117 851 que representa un 2.94 % del parque vehicular, la cantidad de automóviles alcanza las 816,728 unidades representando un 20.38 % del parque vehicular, los vehículos tipo jeep alcanza las 21 200 unidades que representa un 0.53 % del parque vehicular, los vehículos tipo pick up alcanzan las 639,440 unidades representando un 15.96 % del parque vehicular y las motocicletas alcanzan 1,660,364 unidades que representan un 41.44 % del parque vehicular.

De este modo se realizará el análisis dividiendo las categorías de los vehículos, delimitando el análisis a vehículos tipo automóvil.

## **2.2. Vehículos eléctricos**

Como segundo pilar de esta investigación se definirán los tipos de vehículos eléctricos que actualmente existen en el mundo, tipos de motores, tipos de voltaje, caracterización de los modelos.

De acuerdo con Morales Quintana (2014), “se tienen vehículos completamente eléctricos, vehículo eléctrico enchufable, vehículo eléctrico a baterías, vehículo híbrido, vehículo híbrido configuración en serie, vehículo híbrido configuración en paralelo, vehículo híbrido configuración mixta” (p.16).

### **2.2.1. Vehículo eléctrico (EV)**

Se define como vehículo eléctrico a aquel que utiliza uno o varios motores eléctricos para su tracción a partir de la energía eléctrica almacenada en baterías o acumuladores que se recargan desde la red eléctrica, en las baterías se almacena la energía de forma química que se transforma en energía eléctrica y posteriormente, a través del motor eléctrico, se convierte en energía mecánica. Para recargar las baterías, el EV necesita conectarse a una toma de corriente eléctrica, ya sea de baja intensidad de corriente (recarga lenta) o de alta intensidad (recarga rápida). Entre sus principales características, el EV se destaca por su nula contaminación en los entornos urbanos. También cabe comentar su inexistente contaminación acústica, así como los menores costos de uso y mantenimiento. (Morales Quintana, 2014, p.16).

### **2.2.1.1. Vehículo eléctrico enchufable (PHEV)**

“Un vehículo eléctrico enchufable o PHEV está equipado con un motor eléctrico y un motor de combustión de apoyo” (Morales Quintana, 2014, p.18).

#### Diferencias

La diferencia de Vehículo eléctrico enchufable (PHEV) y un vehículo eléctrico a baterías (HEV) es que el vehículo PHEV puede funcionar combinando los dos motores o en modo completamente eléctrico, y la energía del sistema de baterías proviene de la red eléctrica. La combinación de un motor eléctrico y otro de combustión, permite cubrir distancias más largas. Normalmente, el motor de combustión de PHEV es más pequeño que para un HEV. El PHEV tiene la ventaja por su mayor autonomía frente a un HEV porque presenta la autonomía del depósito de combustible y la facilidad de reabastecimiento. (Morales Quintana, 2014, p.18).

### **2.2.1.2. Vehículo eléctrico a baterías (BEV)**

Un vehículo eléctrico a baterías o BEV es propulsado por electricidad almacenada en una batería, diseñadas especialmente para este tipo de vehículo. En general son baterías de Li-Ion o baterías de níquel-hierro. La batería se carga en la red eléctrica convencional o un punto de carga pública. Su principal ventaja es que solo utiliza energía eléctrica como fuente de propulsión. (Morales Quintana, 2014, p.18).

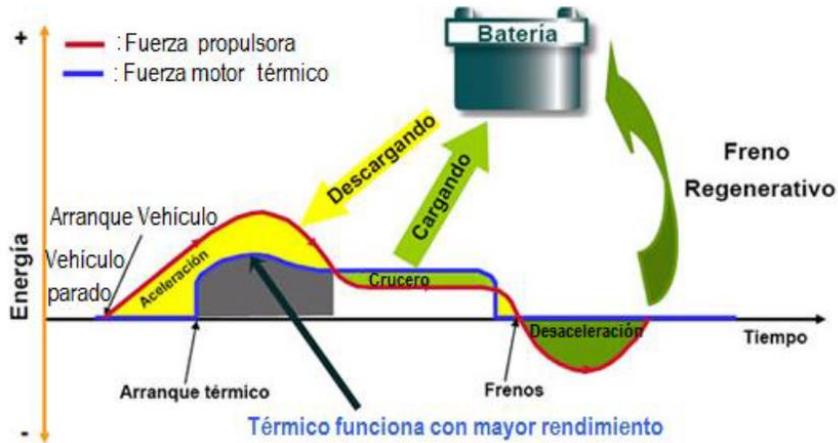
En un vehículo BEV, la configuración es más simple que un sistema de combustión interna y se considera que su mantenimiento es inferior al requerido por un vehículo convencional. Adicionalmente, la vida útil de muchas de las piezas del sistema de tracción supera los 10 años. Otros atributos de los BEV radican en su eficiencia energética, operación a cero emisiones y la posibilidad de incorporar fuentes renovables en la generación de energía eléctrica. (Morales Quintana, 2014, p.19).

### **2.2.2. Vehículo híbrido (HEV)**

Los vehículos eléctricos híbridos HEV de acuerdo con Morales Quintana (2014):

Se definen como los que utilizan un motor eléctrico y un motor de combustión interna para realizar su trabajo y a diferencia de los vehículos eléctricos, los vehículos híbridos utilizan el motor térmico para recargar las baterías por medio del generador y por medio del sistema de freno regenerativo (recuperación de energía cinética al frenar). Los HEV se equipan con motores de combustión interna, diseñados para funcionar con su máxima eficiencia como se aprecia en la Figura 3, si el vehículo genera más energía de la necesaria el motor eléctrico se usa como generador y carga las baterías del sistema. En algunos momentos, solo funciona el motor eléctrico para la tracción. (p.16).

Figura 3. **Energía demandada por un vehículo híbrido en sus diferentes etapas**



Fuente: Morales Quintana. (2014). *Modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá*.

De acuerdo con Morales Quintana (2014) entre los principales beneficios de un vehículo eléctrico híbrido se tiene: mejoran la eficiencia energética, pueden operar sin previa carga de las baterías, hacen mejor uso de los combustibles durante desplazamientos en vías congestionadas y de baja velocidad; evita marchas en vacío del motor de combustión y posibilita el suministro de energía a equipos auxiliares, mientras que los híbridos se pueden fabricar en diferentes configuraciones. (p.17).:

- Híbrido en serie
- Híbrido en paralelo
- Híbrido mixto

### **2.2.2.1. Vehículo híbrido configuración en serie**

El motor térmico impulsa un generador eléctrico, que normalmente cuenta con un alternador trifásico que recarga las baterías. La corriente alterna será rectificadas y alimentará al motor eléctrico para impulsar el vehículo. En esta configuración solo la parte eléctrica dará la tracción, mientras que el motor térmico se empleará en la generación de electricidad. (Morales Quintana, 2014, p.17).

“El dispositivo generador se utiliza principalmente para ampliar la autonomía, por lo que en la mayoría de los kilómetros se circula con las baterías. Cuando la duración del viaje excede la autonomía de la batería, el dispositivo generador se enciende” (Morales Quintana, 2014, p.17).

De acuerdo con Morales Quintana (2014):

La principal ventaja que ofrece este diseño frente al vehículo híbrido en paralelo es un diseño mecánico simple y la desventaja de este tipo de vehículos, es que toda la energía requerida por el motor térmico tiene que atravesar el generador eléctrico sufriendo pérdidas, debido a la transformación de energía mecánica a eléctrica. (p.17).

### **2.2.2.2. Vehículo híbrido configuración en paralelo**

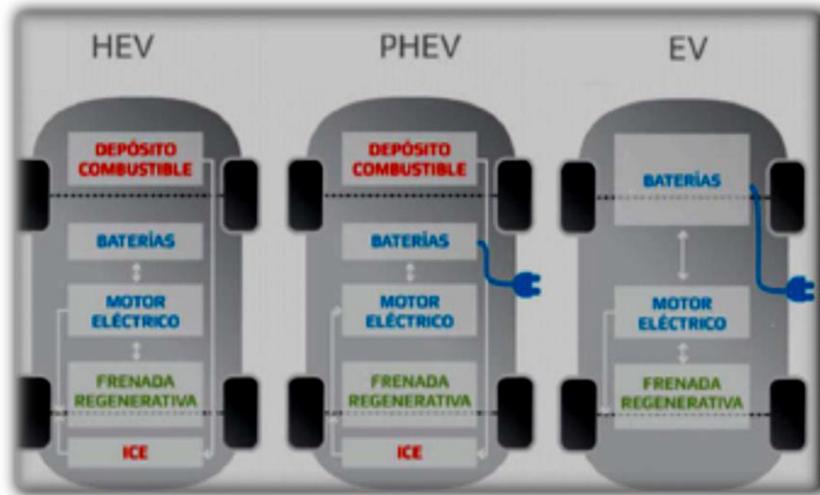
Este tipo de vehículo utiliza el sistema térmico y eléctrico de tracción en paralelo, el motor a gasolina entra en funcionamiento cuando el vehículo necesita más energía, y al detenerse, el híbrido aprovecha la energía normalmente empleada en frenar para recargar su propia batería (frenado regenerativo). Como los patrones de uso de los automóviles tienden a viajes cortos y frecuentes, un vehículo híbrido en paralelo trabajará la mayor parte del tiempo solo con motor eléctrico. Este funcionamiento es ideal, aunque actualmente las baterías de HEV en paralelo tienen muy poca autonomía y funcionan mayormente impulsados por el motor térmico. (Morales Quintana, 2014, p.18).

### **2.2.2.3. Vehículo híbrido configuración mixta**

Esta configuración proporciona la posibilidad de propulsar al vehículo mediante el motor de combustión, el motor eléctrico o mediante una combinación de ambos motores. El concepto de un vehículo mixto es de un vehículo híbrido con arquitectura serie donde es conectado el motor de combustión directamente a las ruedas. Así, tanto el motor de combustión como el generador y el motor eléctrico están interconectados a través de un sistema de engranajes diferencial, que, a su vez, está conectado a la transmisión del vehículo. Esta configuración combina las ventajas de ambos sistemas y es la más utilizada por los fabricantes de automóviles como Toyota en su modelo Prius. (Morales Quintana, 2014, p.18).

“De acuerdo con la figura 4 se tiene de una manera comparativa la configuración para cada uno de los tipos de vehículos eléctricos tratados en las secciones anteriores” (Morales Quintana, 2014, p.17).

Figura 4. **Configuración de tecnologías de los diferentes tipos de vehículos eléctricos**



Fuente: Morales Quintana. (2014). *Modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá*.

### 2.2.3. Tecnología de baterías y sistemas de recarga

“Las baterías representan una parte fundamental en un vehículo eléctrico. Estos proveen la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los motores y por tanto condicionará el desempeño y su autonomía. Consideraciones generales sobre las baterías” (Vides Sierra, 2016, p. 26):

- “Capacidad de almacenamiento: esta característica técnica repercute en la autonomía del vehículo eléctrico, derivado que entre mayor sea la capacidad de almacenamiento mayor será la distancia recorrida y mayor será el tiempo de recarga” (Vides Sierra, 2016, p. 26).

- “Costo: este aspecto es muy variable ya que va disminuyendo con los avances tecnológicos, el costo de la batería representa un alto porcentaje del costo del vehículo de acuerdo con la tecnología y capacidad de la batería” (Vides Sierra, 2016, p. 26).
- “Vida útil: Es un factor muy importante ya que la batería representa un alto costo del vehículo, este período deberá ser considerablemente alto para compensar los costos del vehículo” (Vides Sierra, 2016, p. 26).

### 2.2.3.1. Tipos de baterías

Los tipos de baterías actualmente comercializados son:

- Níquel-hidruro metálico (Ni-MH)
- Plomo ácido
- Iones de litio

Tabla IV. **Características de distintas tecnologías de baterías para vehículos eléctricos**

Topo de batería	Energía específica (Wh/Kg)	Energía/Volumen (Wh/L)	Potencia/Peso (W/Kg)	Eficiencia (%)	Número de ciclos
Pb-ácido	40	60-75	180	82.5	500
Ni-Mh	70	140-300	250-1000	70	1350
Ión-Litio	125	270	1800	90	1000

Fuente: Vides Sierra. (2016). *Diseño de investigación del impacto de la recarga de vehículos eléctricos sobre un circuito de distribución de la Ciudad de Guatemala.*

## **2.2.4. Tipos de recarga de vehículos eléctricos**

En esta sección se definen los tipos de carga existentes en los modelos más comunes de vehículos eléctricos utilizados actualmente en países industrializados y desarrollados como China y Estados Unidos, se tienen las siguientes definiciones:

### **2.2.4.1. Recarga convencional**

De acuerdo con Merchán y Medina (2016), “la recarga convencional o recarga lenta aplica niveles de potencia que aplican una carga con una duración de 8 horas” (p.23).

“Esta carga convencional monofásica emplea la intensidad y voltaje eléctrico del mismo nivel que la propia vivienda, esto implica que la potencia eléctrica que se dará será de 3.7 KW” (Merchán y Medina, 2016, p.23).

### **2.2.4.2. Recarga semirápida**

“La recarga semirápida aplica niveles de potencia que implican una carga con una duración de 4 horas aproximadamente” (Merchán y Medina, 2016, p.24).

De acuerdo con Merchán y Media (2016), “en la carga semirápida el nivel de potencia eléctrica que se puede dar es de 7.3 KW” (p.24).

### **2.2.4.3. Recarga rápida**

“El tipo de recarga rápida emplea una mayor intensidad eléctrica, obteniéndose una potencia de salida del orden de 50 KW” (Merchán y Medina, 2016, p.24).

“Para lograr un 65 % de recarga de la batería se necesitan aproximadamente de 15 minutos dependiendo del tipo del vehículo” (Merchán y Medina, 2016, p.24).

## **2.3. Curva de carga o demanda**

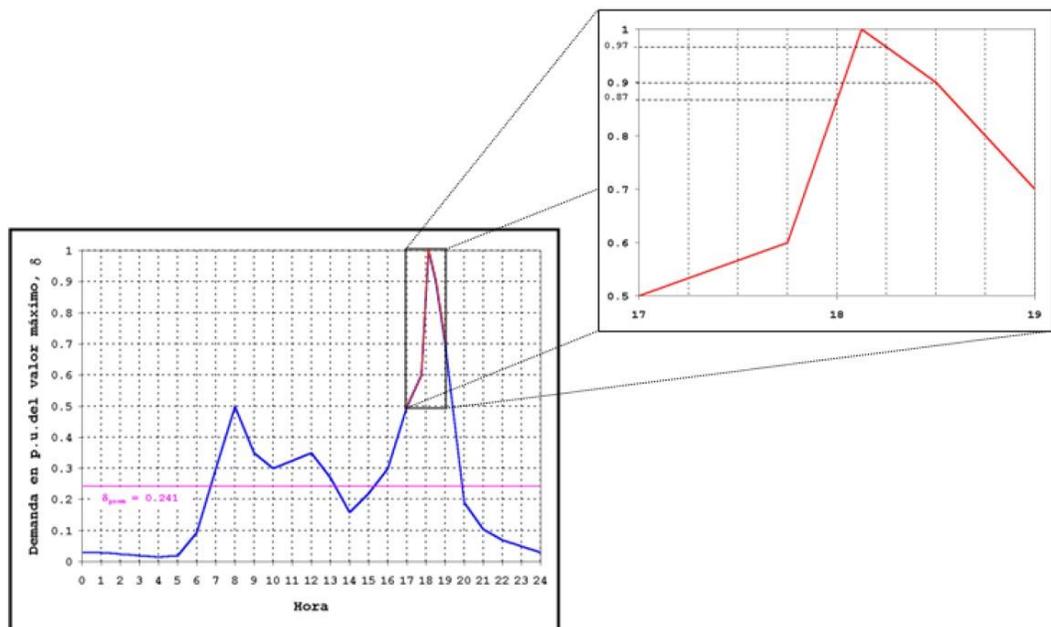
La carga de un sistema de distribución de energía eléctrica es la parte terminal del sistema que convierte la energía eléctrica a otra forma de energía. Por ejemplo, un motor eléctrico convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Más aún, este concepto incluye a todos los artefactos que requieren de energía eléctrica para funcionar o realizar un trabajo. La suma de las intensidades o potencias de placa de todos los artefactos de consumo dependientes del sistema de distribución de energía eléctrica, o de una parte de él, constituye su carga conectada y representa la máxima demanda posible de una instalación. (Espina Alvarado, 2017, p.1).

### **2.3.1. Definición**

La demanda eléctrica de un sistema es la intensidad de corriente, o potencia eléctrica, relativa a un intervalo de tiempo específico, que absorbe su carga para funcionar. Ese lapso es llamado intervalo de demanda, y su indicación es obligatoria a efecto de interpretar un determinado valor de demanda. (Espina Alvarado, 2017, p.1)

Los intervalos de demanda de medición son típicamente de 15, 30 o 60 minutos. Los lapsos de 15 o 30 minutos se aplican comúnmente en facturación, selección de la capacidad de equipos, estudios de balanceo y transferencia de carga. El intervalo de 60 minutos permite construir Perfiles de Carga Diarios (PCD), para el análisis de consumo de energía, determinar el rendimiento de dispositivos, y también para elaborar un completo plan de expansión del sistema de distribución o transporte de energía eléctrica. (Espina Alvarado, 2017, p.2).

Figura 5. **Representación gráfica de una Curva de demanda diaria hipotética, con acercamiento al entorno del valor demanda máxima**



Fuente: Espina Alvarado, J. (Abril, 2017). Carga, demanda y energía eléctrica: conceptos fundamentales para la distribución de electricidad. *Sector Electricidad*, 1-3. Recuperado de <http://www.sectorelectricidad.com/17597/carga-demanda-y-energia-electrica-conceptos-fundamentales-para-la-distribucion-de-electricidad/>

“Se puede observar la curva que representa el comportamiento de esta demanda hipotética durante todo el día tiene una forma continua, y está asociada a un grupo de cargas” (Espina Alvarado, 2017, p.2).

En este sentido el valor de demanda máxima ocurre poco después de la hora 18, pero antes de las 18:15. Si se hubiera dispuesto un instrumento con intervalos de medición de 15 minutos, se registraría como máximo el 97 % del valor real, a las 18:15. Por otra parte, en el caso que el instrumento midiera cada 30 minutos, el máximo registrado sería el 90 % del valor real, a las 18:30. Finalmente, si el intervalo de medición hubiera sido de 1 hora, el valor registrado sería el 87 % del máximo real, a la hora 18. (Espina Alvarado, 2017, p.2).

De este modo, la demanda es una cantidad cuya medida depende del caso de estudio: amperios para la selección o reemplazo de conductores, fusibles, o de interruptores, ajuste de protecciones y balanceo de carga; kilovatios para la planificación del sistema, estudios de energía consumida, energía no vendida, y energía pérdida; kilovoltamperios para la selección de la capacidad de transformadores y alivio de carga. Para estudios de compensación reactiva puede convenir el registro de la demanda en kilovares. (Espina Alvarado, 2017, p.2).

La sucesión de valores de demanda como función del tiempo se denomina Curva de Carga, y su representación gráfica se denomina perfil de carga; cuando tal sucesión corresponde a un día entero se tendrán, respectivamente, una Curva de Carga Diaria (CCD) y un Perfil de Carga Diario (PCD) como el de la figura 5. Por supuesto, el perfil o forma de la curva de carga dependerá del procedimiento de medición. (Espina Alvarado, 2017, p.2).

De acuerdo con Espina Alvarado (2017): “además de la frecuencia de medición determinada por el intervalo de demanda, también el método de muestreo tiene un impacto significativo en la caracterización de la carga. existen dos formas básicas de muestreo en la medición” (p.3)

- Discreto, si el registro es de carga instantánea
- Por integración si se registra la energía absorbida durante cada intervalo.

En el caso discutido de la figura 5, el método de muestreo que usa el instrumento hipotético es de tipo discreto puesto que el censo se realiza al final del intervalo propuesto en cada caso. Esto comúnmente conduce a una traza errática de datos que tergiversa dramáticamente la caracterización de la carga. Por contraste, la mayoría de los equipos mide la energía transferida durante cada intervalo  $\Delta t$ , esto es, haciendo un muestreo por integración. (Espina Alvarado, 2017, p.3).

“Una curva de carga resultante de un muestreo discreto difícilmente es representativa de un comportamiento individual, o de un pequeño grupo” (Espina Alvarado, 2017, p.3).

Derivado que el área bajo un perfil diario continuo de la figura 5, corresponde a la energía total consumida por la carga ese día. Cuando la información de demanda resultante de un muestreo por integración sea dada en forma tabular, la correspondencia del par tiempo-demanda o bien  $(t, d)$ , indica que la demanda promedio o gasto de energía por parte de la carga es  $d = (\text{Energía}|\Delta t)/\Delta t$ , durante el intervalo de demanda (de tamaño  $\Delta t$ ) que finaliza en  $t$ . Así, el área bajo la curva diaria escalonada resultante será efectivamente la energía consumida durante el día en consideración. (Espina Alvarado, 2017, p.3).

La carga es el elemento terminal que cambia la forma de energía para su uso final o bien el usuario, y la demanda es la medida en sus terminales de alimentación de cuán rápido se gasta o consume la energía primaria en un lapso establecido o mejor dicho la necesidad. (Espina Alvarado, 2017, p.3).

#### **2.4. Legislación guatemalteca que regula el uso de vehículos eléctricos**

Se realizó una revisión general a Ley General de Electricidad y su reglamento y en ninguna sección se contempla una regulación para la importación y el uso de vehículos eléctricos.

“De momento en Guatemala no existe una Ley aprobada para el uso e incentivos de estas nuevas tecnologías limpias o libres de contaminantes que brinden autonomía y contribuyan con el medio ambiente” (Franco, 2018, p.1).

En la página web del congreso se encuentra la Iniciativa de Ley 5526 presentada al Pleno del Congreso de la República de Guatemala el 15 de noviembre de 2018, la cual dispone aprobar la Ley de Incentivos a la Importación de Automóviles de Energía no Convencional, esta iniciativa tiene por objeto promover el uso de vehículos que no contaminen el medio ambiente y reducir así los altos niveles de contaminación ocasionados por las emisiones de los vehículos de motor que funcionan con combustibles convencionales, así como fortalecer las políticas públicas para incentivar su uso dentro del sector público y en la ciudadanía en general, pero se ha quedado archivada sin mostrar ningún avance. (Franco, 2018, p.1).

#### **2.4.1. Necesidad de definir una normativa asociada a la incorporación de vehículos eléctricos en Guatemala**

Desde el punto de vista normativo, es necesario un proceso de exploración, conocimiento y adopción de un marco que facilite la incorporación del vehículo eléctrico en Guatemala, tomando como referencia la experiencia en otros países, donde la incorporación del vehículo eléctrico se encuentre en un estado más avanzado, y por tanto más estudiado. (Bohórquez, López, Díez y Díez, 2011, p.111).

De ahí que la incorporación del vehículo eléctrico puede suponer una nueva revolución industrial, con lo que se espera hacer más sostenible el futuro. Sin embargo, todo cambio trae consigo nuevos desafíos en todos los niveles. En lo que respecta a la seguridad, se hace necesario establecer reglamentos especialmente diseñados para la correcta implementación de esta tecnología. Con base en lo anterior, los primeros esfuerzos se deben concentrar en la normalización específica del sector, ya que éstas aún se encuentran por desarrollar. (Bohórquez et al., 2011, p.111).

En ese sentido, se analiza el caso del vecino más cercano de Guatemala, Costa Rica con su “Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico de Costa Rica”.

#### **2.4.2. Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico de Costa Rica**

La Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica atrás de su ley no. 9518 decreta la: “Ley de Incentivos y Promoción para el transporte Eléctrico” (Asamblea Legislativa, 2018, p.1).

La Ley no. 9518 tiene por objeto “crear el marco normativo para regular la promoción del transporte eléctrico en el país y fortalecer las políticas públicas para incentivar su uso dentro del sector público y en la ciudad” (Asamblea Legislativa, 2018, p.1).

Esta ley regula la organización administrativa pública vinculada al transporte eléctrico, las competencias institucionales y su estímulo, por medio de exoneraciones, incentivos y políticas públicas, en cumplimiento de los compromisos adquiridos en los convenios internacionales ratificados por el país y el artículo 50 de la Constitución Política de la República de Costa Rica. (Asamblea Legislativa, 2018, p.1)

La ley consta de 39 artículos repartidos en nueve capítulos, que comprenden desde definiciones, interés público, competencias de los ministerios involucrados, coordinación institucional, capacitación técnica, incentivos de la ley, obligaciones de la administración pública, obligaciones de los importadores de vehículos eléctricos, transporte público, centro de recarga, financiamiento del transporte eléctrico, disposiciones finales y artículos transitorios. (Asamblea Legislativa, 2018, p.1)

### **2.4.3. Normativa internacional**

Alrededor del mundo y en los países que tienen un gran avance tecnológico existen muchas normas relacionadas con el vehículo eléctrico y sus implicaciones en la sociedad y más directamente sobre los usuarios del vehículo. En general, y debido a la tendencia masificación del vehículo en algunos países europeos, se han ido desarrollando y adoptando normas con el fin de establecer medidas que garanticen la seguridad de las

personas, así como el buen funcionamiento de los componentes de los vehículos. (Bohórquez et al., 2011, p.111).

La primera parte de la versión de la norma (ISO 6469-1:2009), especifica los requisitos de seguridad de los sistemas de almacenamiento de energía recargable (RESS) de los vehículos de tracción eléctrica, incluidos los vehículos de batería eléctrica (BEVs), los vehículos de pila de combustible (FCV) y los vehículos eléctricos híbridos (HEV), para la protección de las personas dentro y fuera del vehículo y del entorno del mismo. (Bohórquez et al., 2011, p.111).

La segunda parte de la norma (ISO 6469-2:2009), define los requisitos para los medios de seguridad operacional y la protección contra los fallos relacionados con los riesgos específicos para los vehículos de propulsión eléctrica. (Bohórquez et al., 2011, p.111).

“La tercera parte de la norma (ISO 6469-3:2009), especifica los requisitos para los sistemas de propulsión eléctrica y sistemas conectados por conducción auxiliar para la protección de las personas dentro y fuera de un vehículo eléctrico” (Bohórquez et al., 2011, p.111).

Es imperativo definir, que actualmente la Organización Internacional de Estandarización - ISO, se encuentra trabajando en la actualización y extensión de la norma ISO 6469, a través de un importante proyecto mediante el cual, se están adaptando los requisitos de las normas a los nuevos retos de los vehículos eléctricos con batería (BEV) y vehículos eléctricos híbridos (HEV), que abarcan la seguridad de los vehículos, sistemas de almacenamiento energía recargable, protección contra fallas, entre otras consideraciones. (Bohórquez et al., 2011, p.111).



### **3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo y diseño de la investigación**

La investigación tuvo un alcance de tipo exploratorio porque, actualmente, no hay alguna normativa o ley vigente que regule o incentive el uso de vehículos eléctricos en Guatemala.

El diseño de esta investigación fue no experimental ya que el investigador no tuvo control sobre las variables.

El tipo de investigación se desarrolló por período y se clasifica de acuerdo con el papel que juega el tiempo en la investigación, se realizó un estudio longitudinal (o diacrónico) que dará inicio del año 2020 al año 2030, se dividió en tendencia y de evolución de grupo, específicamente sobre el parque vehicular y el impacto que la carga demandada por los vehículos eléctricos tendrá al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

El enfoque del estudio fue mixto. El primero fue cuantitativo ya que se determinó el crecimiento del parque de vehículos eléctricos basado en el parque de vehículos convencionales. Se utilizaron estos valores para identificar la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos. El segundo enfoque fue cualitativo porque, con base en otras leyes implementadas en países similares a Guatemala, se determinaron los incentivos necesarios para la importación, comercialización y uso de vehículos eléctricos en Guatemala.

### **3.1.1. Alcance de la investigación**

Esta investigación adoptó un alcance de tipo exploratorio de diez años; detalló los aspectos relevantes e históricos del parque de vehículos convencionales de Guatemala; se desarrollaron los conceptos y definiciones técnicas de los vehículos eléctricos, tipos y consideraciones generales por tomar en cuenta, se identificó la demanda que contemple la carga demandada del uso de vehículos eléctricos y se determinaron los incentivos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala. El propósito es contemplar un futuro renovable y que esta investigación sirva para que las instituciones de gobierno y empresas privadas busquen la reducción de la contaminación a través del uso de vehículos eléctricos y la reducción de gases de efecto invernadero.

Los datos obtenidos en la página de la SAT y del AMM fueron recolectados al cierre de agosto de 2020, período en cual se realizó este estudio.

### **3.1.2. Unidad de análisis**

La unidad de análisis fue el mercado de vehículos de transporte de Guatemala. Esta unidad de análisis se tomó como base de estudio para proyectar el mercado de vehículos eléctricos. Con un número aproximado de vehículos eléctricos se identificó la carga requerida por ellos y se estimó el consumo promedio sumando estos valores a la demanda máxima histórica del SNI, al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019.

### 3.1.3. Variables e indicadores

En la siguiente tabla de se muestra un resumen de las variables e indicadores utilizados en el estudio, detalle:

Tabla V. Variables e indicadores

Variable	Numérica		Manipulable	Observable	Escala de medición	Operacionalización	Dimensión	Indicador
	Discreta	Continua						
Comportamiento de la curva de demanda		X		X	Intervalo	Medición, Demanda proyectada + demanda proyectada del uso de vehículos eléctricos	Consumo de energía horario (KWH)	carga base, potencia mínima, potencia máxima
Número actual de Vehículos automotores en Guatemala		X		X	De razón	Medición, Inventario actual de vehículos obtenidos de la página de la SAT	Unidades	Tasa de crecimiento mensual de vehículos convencionales, inventario actual de la SAT
Porcentaje de crecimiento de parque de vehículos eléctricos	X			X	De razón	Se proyectará el crecimiento del parque de vehículos eléctricos basado en el crecimiento del parque de vehículos convencionales	Porcentual	Tasa de crecimiento mensual de vehículos convencionales

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Revisión documental

En esta fase se buscaron y consultaron fuentes de información, como libros, artículos científicos, revistas reconocidas, estudios eléctricos, reglamentos leyes internacionales, entre otros; en países donde está cobrando auge el uso de vehículos eléctricos, aspectos técnicos de vehículos eléctricos, tipos, tipos de baterías, iniciativas de ley utilizadas en otros países en proceso de implementación.

Se obtuvieron datos de acceso al público, entre los cuales se puede mencionar:

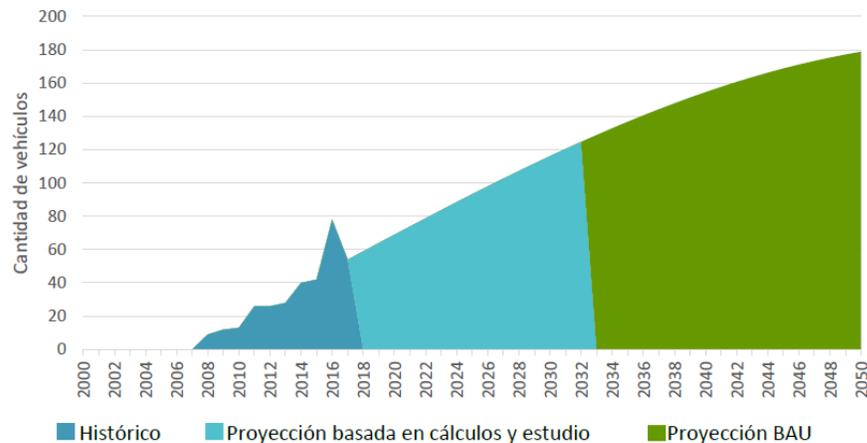
- Ministerio de Energía y Minas, de esta institución se obtuvo:
  - Plan de Expansión Indicativo de Sistema de Generación 2020-2050.
  - Política Energética 2019-2050.
  
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica, de esta institución se obtuvo:
  - Comportamiento de la matriz energética.
  - Resoluciones.
  - Ley General de Electricidad.
  - Normas de coordinación comercial y operativa.
  - Reglamentos.
  
- Administrador del Mercado Mayorista, de esta institución se obtuvo:
  - Capacidad instalada a septiembre 2020.
  - Estadísticas del Mercado Mayorista.
  - Oferta firme eficiente.
  - Precios Spot anuales.
  - Informes estadísticos anuales del año 2015 al año 2019.
  - Posdepachos mensuales de mayo del año 2019.
  - Posdespacho diario del día 16 de mayo del año 2019.
  - Programa de despacho diario del día 16 de mayo del año 2019.

- Superintendencia de Administración Tributaria, de esta institución se obtuvo:
  - Parque vehicular clasificado por tipo de vehículo.
  - Parque vehicular clasificado por región y departamento.

### 3.3. Identificación de la demanda derivada del uso masivo de vehículos eléctricos

Se proyectó el crecimiento del parque de vehículos eléctricos de forma masiva y se identificó la demanda que sería requerida por el parque de vehículos eléctricos. Como primera referencia se analizó la proyección de vehículos eléctricos activos con motor eléctrico para Guatemala, contenida en la Política Energética 2019-2050. En este documento se establece que, para 2050, habrá aproximadamente, 180 vehículos eléctricos. Dado que este número es muy bajo y poco significativo no se tomará este dato como referencia.

Figura 6. **Proyección de vehículos activos con motor eléctrico en Guatemala**



Fuente: Unidad de Planeación Energético Minero. (2019). *Política Energética 2019-2050*.

Dada la similitud entre el mercado eléctrico guatemalteco y el chileno se compararon escenarios vehiculares entre ambos países.

“El comportamiento de parque vehicular eléctrico está en crecimiento en Chile y, de acuerdo con el sitio web de ICARE, se estima que para 2030 el 10 % del parque vehicular será eléctrico” (ICARE, 2019, p.1).

“En relación a la electromovilidad, se menciona que la venta de vehículos eléctricos ha ido creciendo en el último tiempo. Esto se concentra básicamente en China, Estados Unidos y Europa. La razón que lo explica es porque tienen subsidios directos que equiparan el precio con el vehículo a combustión interna” (ICARE, 2019, p.1).

“En Chile todavía es incipiente, pero ha habido pasos importantes. En 2018 se vendieron 197 vehículos eléctricos livianos, sobre unas ventas totales de vehículos livianos de 420 mil” (ICARE, 2019, p.1).

En 2020, en Guatemala se habían vendido 60 vehículos eléctricos y el parque vehicular de Guatemala, de acuerdo con el sistema de registro fiscal del país, alcanzó 4 006 883 unidades de vehículos al cierre de agosto-2020.

### **3.3.1. Escenario de penetración masiva de vehículos eléctricos**

En esta fase se utilizaron las técnicas de investigación de observación y crecimiento geométrico, ya que se creó un modelo de crecimiento de vehículos eléctricos y se estimó el consumo promedio sumando estos valores a la demanda máxima histórica del SNI, al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019 de acuerdo con los programas de despacho diario publicados por el AMM.

Se utilizaron tablas de recolección de datos del parque de vehículos convencionales que se obtuvieron de la página de la SAT, con lo cual se generó un modelo de crecimiento del parque de vehículos eléctricos, de acuerdo con las características principales de los carros eléctricos que actualmente se están produciendo y comercializando en todo el mundo.

### **3.3.2. Definición de escenario**

Al cierre de agosto de 2020 la cantidad existente de autobuses, buses y microbuses corresponde a 117,851 que representa un 2.94 % del parque vehicular, la cantidad de automóviles alcanza las 816,728 unidades representando un 20.38 % del parque vehicular. Los vehículos tipo todo terreno alcanzan las 21,200 unidades que representa un 0.53 % del parque vehicular, los vehículos tipo *pick up* alcanzan las 639,440 unidades representando un 15.96 % del parque vehicular y las motocicletas alcanzan 1,660,364 unidades que representan un 41.44 % del parque vehicular.

De este modo, se realizó el análisis dividiendo las categorías de los vehículos, delimitando el análisis a vehículos tipo automóvil, dando un total de 816,728 unidades.

De acuerdo con la similitud del mercado eléctrico guatemalteco con el chileno, basado en la publicación de ICARE y a su proyección de que para el año 2030 el porcentaje de vehículos eléctricos será del 10 % del parque vehicular, tomando como referencia que Guatemala se encuentra en vías de desarrollo y que su mercado eléctrico va en desarrollo y para proyectar una masificación de vehículos eléctricos se estimó que para Guatemala el porcentaje de vehículos eléctricos para el año 2030 será del 5 % de la unidad de análisis de vehículos tipo automóvil.

### **3.3.3. Cálculo aproximado de la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos**

Se calculó la carga requerida por el parque de vehículos eléctricos, de acuerdo con los tipos de carga de los vehículos eléctricos descritos en la sección 2.2.4 del capítulo 2, entre los cuales se tiene carga lenta, carga semirápida y carga rápida. Se calculó la demanda horaria requerida por el uso de los vehículos eléctricos.

### **3.4. Impacto al Sistema Nacional Interconectado con el uso masivo de vehículos eléctricos**

Sobre la base de la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos que se identificó por medio de la recolección de datos estimados para el parque de vehículos eléctricos, se determinó el impacto que esto tendrá sobre el Sistema Nacional Interconectado (SNI) de Guatemala. Se analizó la curva de demanda, el análisis de despacho de generación, la comparación del Precio de Oportunidad de la Energía (POE) y se identificó si la oferta instalada de generación será capaz de satisfacer la carga requerida con el uso de vehículos eléctricos.

Para determinar el impacto que la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos se sumó esta carga a la demanda máxima registrada del sin. Para ello, se utilizó el día de mayor demanda máxima histórica del SNI. Al realizar este estudio, la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019. Con la información anterior y el uso del software NCP de PSR se estimó la programación de operación a corto plazo para un día de demanda máxima que contemple el uso masivo de vehículos eléctricos.

Se simuló la operación con un despacho hidrotérmico, sin ninguna restricción de transmisión (operando con las líneas actuales del SNI), considerando toda la capacidad instalada del parque hídrico, térmicos y las demás fuentes de generación. La herramienta minimiza los costos de producción, incluyendo el consumo de combustibles (costo variable de producción y arranque), costo de déficit, restricciones operativas, etc.

El modelo empleado por el programa de simulación contó con los siguientes insumos:

- Ecuación de balance de la demanda horaria para cada barra, incluyendo las pérdidas nodales de la red de transmisión.
- El modelo de flujo de potencia lineal, que incluye las restricciones de capacidad en los circuitos para el caso base y contingencias.
- Ecuación de balance hídrico para plantas en cascadas (para el hidroeléctricas en los ríos Cahabón y Michatoya) considerando el tiempo de viaje del agua y la propagación de la onda.
- Restricciones de potencia máxima y mínima para cada central, considerando las decisiones de *unit commitment* (minimizar el costo total de la generación en un período específico).

- Restricciones sobre caudales máximos y mínimos aguas abajo y restricciones sobre la tasa de las variaciones de estos caudales.
- Para centrales con embalse de regulación anual y mensual; generación meta, volumen meta y lectura en función de costo futuro.
- Restricciones de centrales térmicas: tiempo mínimo de operación y detención, rampas de potencia, disponibilidad de combustible y número de arranques.
- Restricciones de seguridad (reserva primaria y secundaria, restricciones de suma de flujos en circuitos, restricciones genéricas de generación).

La solución al programa de despacho diario se alcanzó con el programa NCP el cual utiliza técnica avanzadas de programación mixta lineal-entera.

### **3.5. Incentivos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala**

En esta fase de la investigación se utilizó la técnica de investigación documental. Para ello, se recopilaron leyes implementadas en países donde se haya implementado el uso de vehículos eléctricos, específicamente, en Costa Rica. Se analizaron los criterios aplicables en Guatemala para determinar los incentivos de la importación de vehículos eléctricos en Guatemala. El fin primordial es contribuir con el medio ambiente, así como incentivar a las empresas públicas y privadas a la implementación de vehículos eléctricos, con incentivos económicos que garanticen para las empresas importadoras de vehículos eléctricos y con esa incorporación ir reduciendo gradualmente el uso de vehículos convencionales que dependan de combustibles fósiles o convencionales.

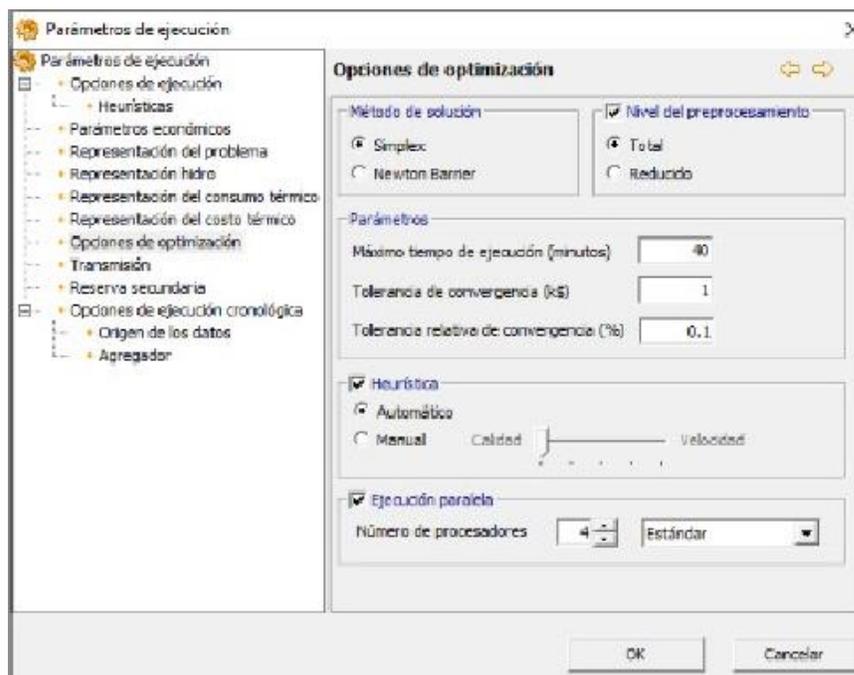
### 3.6. Técnicas estadísticas de análisis de información

Para el desarrollo de la investigación se tiene las siguientes técnicas estadísticas de análisis de información:

#### 3.6.1. Tolerancia de los resultados obtenidos

La herramienta computacional NCP tiene la opción de definir las diferentes tolerancias de convergencia de los resultados obtenidos, los cuales se definieron para las simulaciones de despacho realizadas, de acuerdo con la siguiente figura:

Figura 7. Tolerancias de convergencia



Fuente: elaboración propia.

Como se identifica en la figura 7, la tolerancia de convergencia utilizada fue de 1 kUS\$ y la tolerancia relativa de convergencia fue de 0.1 %, valores que fueron recomendados y definidos previamente por el investigador con base en su experiencia en el uso de la herramienta NCP. Es imperativo mencionar que la tolerancia de convergencia corresponde a cuando la diferencia entre la mejor solución encontrada y un límite superior es menor que la tolerancia definida y la tolerancia relativa de convergencia es una forma alternativa de definir la tolerancia de convergencia.

### **3.6.2. Métodos de análisis de datos**

Debido a la estacionalidad de los datos proyectados, obtenidos, principalmente, de las simulaciones de despacho de generación de electricidad para cada escenario se realizará una comparación entre la cantidad de energía y potencia requerida del SNI sin el uso de los EV's y la cantidad de energía y potencia que contemple el uso de los EV's. Se tomó tal decisión porque calcular el promedio de los datos analizados para cada variable, no sería representativo de la información, ya que las variaciones de los datos obtenidos entre cada escenario hubieran podido llegar a ser muy grandes, debido a la estacionalidad mencionada, lo cual también hubiera repercutido en que el cálculo de la desviación estándar arrojará un valor que no hubiera sido representativa de lo que realmente se analizó.

## 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Cálculo aproximado de la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos

Se estimó que, para Guatemala, el porcentaje de vehículos eléctricos para el año 2030 será del 5 % de la unidad de análisis de vehículos tipo automóvil.

Tabla VI. **Proyección parque vehicular de Guatemala para el año 2030**

Tipo de vehículo	Totales						
Tipo y año	4,006,883	4,342,358	4,726,986	5,130,597	5,525,627	5,905,913	
Año proyectado	2,020	2,022	2,024	2,026	2,028	2,030	
Autobuses, buses, microbuses	117,851	128,648	132,785	137,924	143,588	149,067	
Automóviles	816,728	891,804	949,686	1,012,782	1,075,706	1,134,269	56,713 (Unidad de análisis 5%)
Camiones, cabezales y transporte de carga	168,719	183,137	191,184	200,719	211,030	221,358	
Camionetas, camionetillas y tipo panel	527,841	549,850	611,546	675,779	739,516	798,469	
Carretas, carretones, remolques, etc.	10,795	12,617	13,804	14,963	16,028	17,028	
Furgones y plataformas	28,768	32,100	34,173	36,336	38,485	40,438	
Grúas	1,492	1,566	1,752	1,944	2,129	2,312	
Jeep	21,200	22,646	22,660	22,862	23,202	23,622	
Motocicletas	1,660,364	1,802,581	2,018,228	2,238,244	2,446,459	2,647,687	
Pick-up	639,440	701,929	734,558	771,281	810,510	851,443	
Tractores y mini tractores	837	905	872	835	803	776	
Otros	12,848	14,575	15,738	16,928	18,172	19,446	

Fuente: elaboración propia con datos de la Superintendencia de Administración tributaria, SAT. (2020). *Parque vehicular*. Consultado el 27 de Septiembre de 2020. Recuperado de <https://portal.sat.gob.gt/portal/parque-vehicular/>

Según la tabla VI, la unidad de análisis de estudio de vehículos tipo automóviles fue de 1 134 269 proyectada para el año 2030. Sobre esa base se calcula el cinco por ciento de la unidad de análisis y se obtiene la siguiente tabla.

Tabla VII. **Unidad de análisis proyectada de vehículos eléctricos**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
Total vehículos del parque vehicular proyectado	5,905,913
Año proyectado	2,030
Unidad de análisis parque vehicular (Tipo Automóviles)	1,134,269
Unidad de análisis proyectado de vehículos eléctricos (5 %)	56,713

Fuente: elaboración propia.

Para realizar el cálculo de la carga requerida por los vehículos eléctricos, se procedió a clasificar el tipo de recarga de los vehículos eléctricos, se tiene lo siguiente:

Porcentaje de vehículos a recargarse en carga lenta 75 %

Porcentaje de vehículos a recargarse en semirápida lenta 20 %

Porcentaje de vehículos a recargarse en rápida 5 %

En ese sentido se procedió a calcular el consumo promedio demandado por el uso masivo de vehículos eléctricos:

Tabla VIII. **Cálculo de la demanda horaria requerida por los vehículos eléctricos**

Unidad de análisis proyectado de vehículos eléctricos tipo automóvil						
				<b>56,713</b>		
Unidad de análisis proyectado de vehículos eléctricos	Porcentaje de la unidad de análisis	Tiempo de recarga (horas)	Potencia entregada (KW)	Cantidad de vehículos	Horario de carga	Potencia horaria (MW)
Vehículos en recarga lenta	75%	8.00	3.7	42535	22:01 a 06:00	157.38
Vehículos en recarga semirápida	20%	4.00	7.3	11343	14:01 a 18:00	82.80
Vehículos en recarga rápida	1%	0.25	50.0	567	16:01 a 16:15	28.35
Vehículos en recarga rápida	1%	0.25	50.0	567	17:01 a 17:15	28.35
Vehículos en recarga rápida	1%	0.25	50.0	567	18:01 a 18:15	28.35
Vehículos en recarga rápida	1%	0.25	50.0	567	19:01 a 19:15	28.35
Vehículos en recarga rápida	1%	0.25	50.0	567	20:01 a 20:15	28.35

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Carga horaria requerida por los EV's de 00:00 a 8:00**

De	A	Carga lenta	Carga semirápida	Carga rápida	Total (MW)
00:01	00:15	157.38			157.38
00:16	00:30	157.38			157.38
00:31	00:45	157.38			157.38
00:46	01:00	157.38			157.38
01:01	01:15	157.38			157.38
01:16	01:30	157.38			157.38
01:31	01:45	157.38			157.38
01:46	02:00	157.38			157.38
02:01	02:15	157.38			157.38
02:16	02:30	157.38			157.38
02:31	02:45	157.38			157.38
02:46	03:00	157.38			157.38
03:01	03:15	157.38			157.38
03:16	03:30	157.38			157.38
03:31	03:45	157.38			157.38
03:46	04:00	157.38			157.38
04:01	04:15	157.38			157.38
04:16	04:30	157.38			157.38
04:31	04:45	157.38			157.38
04:46	05:00	157.38			157.38
05:01	05:15	157.38			157.38
05:16	05:30	157.38			157.38
05:31	05:45	157.38			157.38
05:46	06:00	157.38			157.38
06:01	06:15				0.00
06:16	06:30				0.00
06:31	06:45				0.00
06:46	07:00				0.00
07:01	07:15				0.00
07:16	07:30				0.00
07:31	07:45				0.00
07:46	08:00				0.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Carga horaria requerida por los EV's de 08:01 a 16:00**

De	A	Carga lenta	Carga semirápida	Carga rápida	Total (MW)
08:01	08:15				0.00
08:16	08:30				0.00
08:31	08:45				0.00
08:46	09:00				0.00
09:01	09:15				0.00
09:16	09:30				0.00
09:31	09:45				0.00
09:46	10:00				0.00
10:01	10:15				0.00
10:16	10:30				0.00
10:31	10:45				0.00
10:46	11:00				0.00
11:01	11:15				0.00
11:16	11:30				0.00
11:31	11:45				0.00
11:46	12:00				0.00
12:01	12:15				0.00
12:16	12:30				0.00
12:31	12:45				0.00
12:46	13:00				0.00
13:01	13:15				0.00
13:16	13:30				0.00
13:31	13:45				0.00
13:46	14:00				0.00
14:01	14:15		82.80		82.80
14:16	14:30		82.80		82.80
14:31	14:45		82.80		82.80
14:46	15:00		82.80		82.80
15:01	15:15		82.80		82.80
15:16	15:30		82.80		82.80
15:31	15:45		82.80		82.80
15:46	16:00		82.80		82.80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Carga horaria requerida por los EV's de 16:01 a 24:00**

De	A	Carga lenta	Carga semirápida	Carga rápida	Total (MW)
16:01	16:15		82.80	28.35	111.15
16:16	16:30		82.80		82.80
16:31	16:45		82.80		82.80
16:46	17:00		82.80		82.80
17:01	17:15		82.80	28.35	111.15
17:16	17:30		82.80		82.80
17:31	17:45		82.80		82.80
17:46	18:00		82.80		82.80
18:01	18:15			28.35	28.35
18:16	18:30				0.00
18:31	18:45				0.00
18:46	19:00				0.00
19:01	19:15			28.35	28.35
19:16	19:30				0.00
19:31	19:45				0.00
19:46	20:00				0.00
20:01	20:15			28.35	28.35
20:16	20:30				0.00
20:31	20:45				0.00
20:46	21:00				0.00
21:01	21:15				0.00
21:16	21:30				0.00
21:31	21:45				0.00
21:46	22:00				0.00
22:01	22:15	157.38			157.38
22:16	22:30	157.38			157.38
22:31	22:45	157.38			157.38
22:46	23:00	157.38			157.38
23:01	23:15	157.38			157.38
23:16	23:30	157.38			157.38
23:31	23:45	157.38			157.38
23:46	24:00	157.38			157.38

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2. Impacto al sistema nacional interconectado con el uso de vehículos eléctricos**

Para determinar el impacto que la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos tendrá sobre el SIN se sumó esta carga a la demanda máxima histórica del SIN. Al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019, con la herramienta NCP se estimó la programación de operación a corto plazo para un día de demanda máxima.

Se utilizó la tolerancia de convergencia determinada por el investigador (1kUS\$ y 0.1 %), “el modelo converge cuando la tolerancia entre la mejor solución encontrada y límite superior es menor a la tolerancia definida” (PSR, 2020, p.20).

De acuerdo con lo anterior se tienen los siguientes impactos:

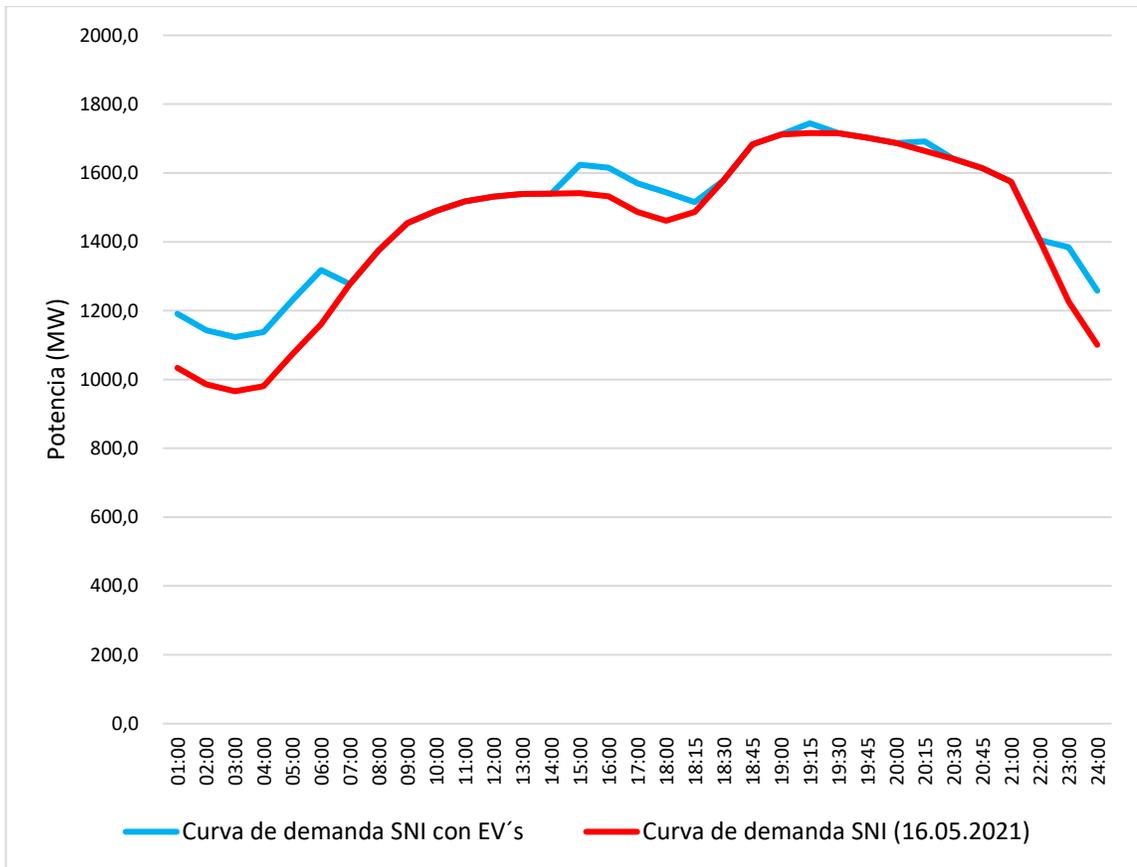
- Impacto a la demanda del sistema nacional interconectado: con respecto a la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos, se tiene la siguiente grafica en la cual se compara la demanda máxima histórica del SIN, al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019 versus la demanda máxima proyectada con el uso masivo de vehículos eléctricos, se tiene la siguiente tabla resumen (tolerancia de convergencia de 1 kUS\$ y tolerancia relativa de convergencia de 0.1 %).

Tabla XII. **Demanda local con vehículos eléctricos comparada con la demanda local sin vehículos eléctricos (Demanda máxima histórica \_ 16.05.2020)**

Horario		Demanda local (con EV's) (MW)	Demanda local (16.05.20) sin EV's (MW)	Diferencia
De	A			
00:01	01:00	1190.8	1033.5	157.4
01:01	02:00	1143.4	986.0	157.4
02:01	03:00	1123.2	965.8	157.4
03:01	04:00	1138.0	980.6	157.4
04:01	05:00	1231.1	1073.8	157.4
05:01	06:00	1318.2	1160.8	157.4
06:01	07:00	1277.0	1277.0	0.0
07:01	08:00	1375.4	1375.4	0.0
08:01	09:00	1454.3	1454.3	0.0
09:01	10:00	1490.0	1490.0	0.0
10:01	11:00	1517.7	1517.7	0.0
11:01	12:00	1531.4	1531.4	0.0
12:01	13:00	1539.5	1539.5	0.0
13:01	14:00	1539.7	1539.7	0.0
14:01	15:00	1624.2	1541.4	82.8
15:01	16:00	1615.3	1532.5	82.8
16:01	17:00	1569.8	1487.0	82.8
17:01	18:00	1544.1	1461.4	82.8
18:01	18:15	1515.2	1486.8	28.4
18:16	18:30	1579.6	1579.5	0.0
18:31	18:45	1683.5	1683.5	0.0
18:46	19:00	1712.0	1712.0	0.0
19:01	19:15	1744.5	1716.2	28.4
19:16	19:30	1715.5	1715.5	0.0
19:31	19:45	1702.2	1702.2	0.0
19:46	20:00	1687.5	1687.5	0.0
20:01	20:15	1692.0	1663.6	28.4
20:16	20:30	1640.6	1640.6	0.0
20:31	20:45	1614.0	1614.0	0.0
20:46	21:00	1574.7	1574.7	0.0
21:01	22:00	1404.8	1404.8	0.0
22:01	23:00	1384.1	1226.7	157.4
23:01	24:00	1258.2	1100.8	157.4
Energía (GWH)		34235.4	32624.4	1611.0

Fuente: elaboración propia.

**Figura 8. Curva de demanda máxima histórica para el SNI registrada el día 16 de mayo de 2019 comparada con la curva de demanda máxima proyectada con el uso masivo de vehículos eléctricos**



Fuente: elaboración propia.

De la figura no. 8 se tiene que de acuerdo con el programa de despacho diario publicado por el Administrador del Mercado Mayorista al día de demanda máxima histórica del SNI, al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019, en el cual se registra una potencia de 1716.2 MW versus la demanda máxima proyectada con el uso de vehículos eléctricos de 1744.5 MW, se tiene una diferencia de 28.4 MW, para el horario de potencia en punta que ocurre aproximadamente a las 19:00 horas.

De igual forma se identifica que a partir de las 22:00 horas hasta las 06:00 del día siguiente se tiene una diferencia aproximada de 157.4 MW los cuales corresponden a la demanda generada por la carga de los vehículos eléctricos.

- Análisis del despacho de generación: la capacidad instalada del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala es de 3,405.3 MW de acuerdo con la base de datos del Administrador del Mercado Mayorista, esta capacidad instalada que tiene el SNI no refleja la capacidad disponible para el despacho de generación, en tal sentido hay centrales que quedan fuera del despacho de generación por los siguientes motivos:
  - Indisponibilidades
  - Por mantenimiento programado
  - Salidas forzadas (debidas a problemas mecánicos, etc.)
  - Por despacho económico
  - Indisponibilidad por falta de combustible
  
- Análisis del POE: de acuerdo con el análisis al programa de despacho proyectado para un día de potencia máxima con el uso de vehículos eléctricos se tiene la siguiente tabla (tolerancia de convergencia de 1 kUS\$ y tolerancia relativa de convergencia de 0.1 %):

Tabla XIII. **Precio de oportunidad de la energía previsto con el uso de vehículos eléctricos**

<b>De:</b>	<b>A:</b>	<b>(US \$/MWH)</b>	<b>Central Generadora</b>
00:00	01:00	118.91	Arizona
01:00	02:00	118.91	Arizona
02:00	03:00	118.91	Arizona
03:00	04:00	118.91	Arizona
04:00	05:00	120.26	Las Palmas 1
05:00	06:00	121.77	Chixoy
06:00	07:00	121.14	Las Palmas 3
07:00	08:00	132.78	Jurún Marinalá
08:00	09:00	132.78	Jurún Marinalá
09:00	10:00	132.78	Jurún Marinalá
10:00	11:00	122.44	Chixoy
11:00	12:00	122.44	Chixoy
12:00	13:00	122.44	Chixoy
13:00	14:00	122.44	Chixoy
14:00	15:00	122.44	Chixoy
15:00	16:00	122.44	Chixoy
16:00	17:00	121.14	Las Palmas 2
17:00	18:00	121.14	Las Palmas 3
18:00	19:00	121.29	Las Palmas 3
19:00	20:00	121.29	Las Palmas 3
20:00	21:00	121.29	Las Palmas 3
21:00	22:00	121.29	Las Palmas 3
22:00	23:00	120.26	Las Palmas 3
23:00	24:00	66.20	Magdalena Bloque 6
Promedio:		120.24	

Fuente: elaboración propia.

De igual forma de acuerdo con el programa de despacho diario publicado en la página web del AMM el día 16 de mayo de 2019 que fue la demanda máxima histórica registrada del SNI al momento de recolectar los datos para realizar este estudio, se tiene la siguiente tabla con el precio de oportunidad de la energía (tolerancia de convergencia de 1 kUS\$ y tolerancia relativa de convergencia de 0.1 %).

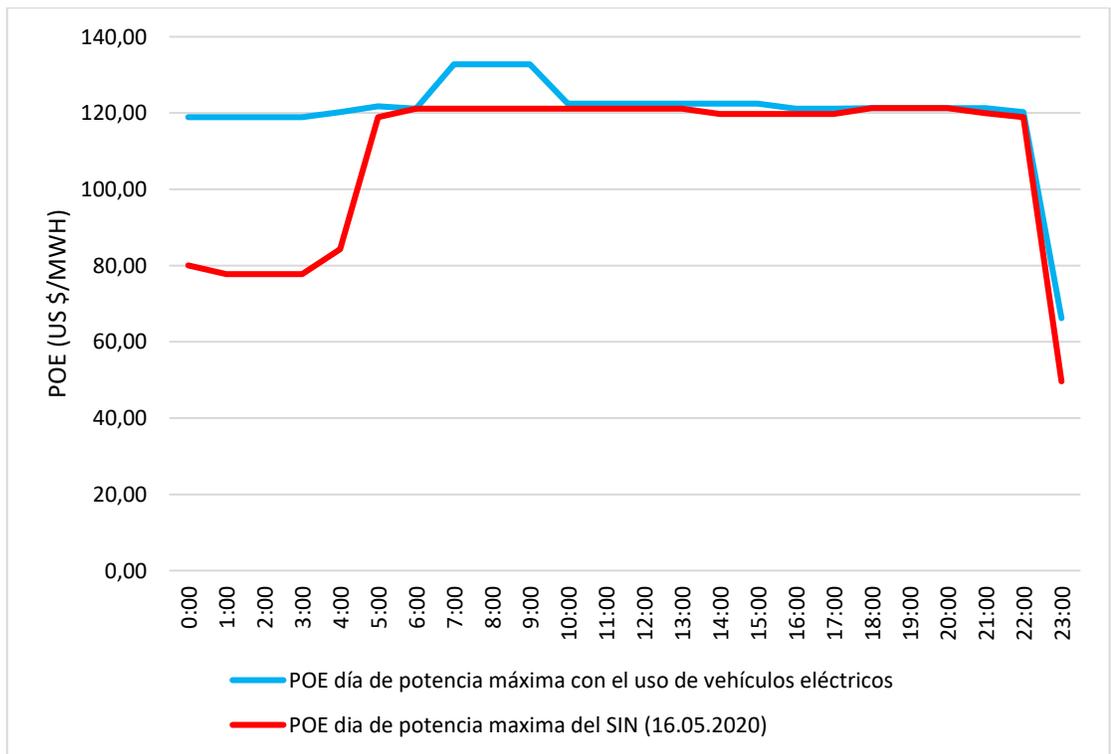
Tabla XIV. **Precio de oportunidad de la energía 16 de mayo de 2019**

<b>De:</b>	<b>A:</b>	<b>(US \$/MWH)</b>	<b>Central generadora</b>
00:00	01:00	80.06	Trinidad bloque 5
01:00	02:00	77.76	Palo Gordo bloque 2
02:00	03:00	77.76	Palo Gordo bloque 2
03:00	04:00	77.76	Palo Gordo bloque 2
04:00	05:00	84.30	Trinidad bloque 4
05:00	06:00	118.91	Arizona
06:00	07:00	121.14	Las palmas 2
07:00	08:00	121.14	Las palmas 3
08:00	09:00	121.14	Las palmas 3
09:00	10:00	121.14	Las palmas 3
10:00	11:00	121.14	Las palmas 2
11:00	12:00	121.14	Las palmas 2
12:00	13:00	121.14	Las palmas 2
13:00	14:00	121.14	Las palmas 2
14:00	15:00	119.77	Arizona
15:00	16:00	119.77	Arizona
16:00	17:00	119.77	Arizona
17:00	18:00	119.77	Arizona
18:00	19:00	121.29	Las palmas 3
19:00	20:00	121.29	Las palmas 3
20:00	21:00	121.29	Las palmas 3
21:00	22:00	119.99	Arizona
22:00	23:00	118.91	Arizona
23:00	24:00	49.63	Jaguar Energy u2
Promedio:		109.046	

Fuente: Administrador del Mercado Mayorista (AMM). (2019). *Programa de despacho diario*  
16.05.2019.

Si se compara la tabla XIII con la tabla XIV se tiene que el precio de oportunidad de la energía promedio tiene una variación de 11.19 dólares que representan un aumento derivado de la carga demandada por el uso de vehículos eléctricos.

**Figura 9. POE día de potencia máxima histórica registrada del SNI (16.05.2019) comparado con el día de potencia máxima con el uso de Vehículos eléctricos**



Fuente: Elaboración propia con base en el programa de despacho diario publicado del AMM del día 16.05.2019. Administrador del Mercado Mayorista (AMM). (2019). *Programa de despacho diario 16.05.2019.*

De la figura 9 se tiene que la mayor diferencia en el precio de oportunidad de la energía se tiene entre las 00:00 y 04:00 horas, siendo esta diferencia de aproximadamente 41.15 US \$/MWh, esto derivado de la carga de los vehículos eléctricos los cuales se cargarían en su mayoría en la hora de demanda baja del SNI.

- Oferta disponible para el cubrimiento de la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos: actualmente el parque generador del SNI cuenta con una potencia instalada de 3,405.3 MW de acuerdo con la base de datos del AMM, en tal sentido de acuerdo con la tabla XII y la figura 8 de comparación de demandas de potencia máxima del SNI y potencia máxima con el uso de los vehículos eléctricos se tiene la oferta disponible de generación está en condiciones óptimas para abastecer la carga requerida por el uso de vehículos eléctricos.

#### **4.3. Incentivos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala**

De acuerdo con el análisis realizado a la Ley No. 9518. Incentivos y promoción para el transporte eléctrico. Asamblea Legislativa. San José, Costa Rica. 28 de Enero de 2018.

“Esta ley regula la organización administrativa y pública vinculada con el uso de vehículos eléctricos, las competencias institucionales y su estímulo, por medio de exoneraciones, incentivos y políticas públicas, cumplimiento con los compromisos adquiridos por Costa Rica y el artículo 50 de su Constitución Política” Ley No. 9518. Incentivos y promoción para el transporte eléctrico. Asamblea Legislativa. San José, Costa Rica. 28 de Enero de 2018.

Después del análisis exhaustivo se proponen los siguientes incentivos mínimos para la importación y promoción del transporte eléctrico en Guatemala:

Incentivos mínimos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala: en busca de promover la importación de vehículos eléctricos y posteriormente la comercialización de vehículos eléctricos, se proponen los siguientes incentivos:

- Exoneración de pago del Impuesto Aduanero a la importación
- Exoneración de pago del Impuesto al Valor Agregado (IVA)
- Exoneración de pago del Impuesto de Circulación

Basado en la Iniciativa de Ley 5526. Ley de incentivos a la importación de automóviles de energía no convencional. Congreso de la República de Guatemala. Guatemala. 15 de noviembre de 2018. Y en la Ley No. 9518. Incentivos y promoción para el transporte eléctrico. Asamblea Legislativa. San José, Costa Rica. 28 de Enero de 2018, se tiene la siguiente tabla resumen:

**Tabla XV. Incentivos mínimos para la importación y promoción del transporte eléctrico**

<b>Porcentaje del parque vehicular</b>	<b>Exoneración del impuesto al Valor Agregado (IVA)</b>	<b>Exoneración del impuesto de circulación</b>	<b>Exoneración del impuesto aduanero de importación</b>
Parque de vehículos eléctricos represente el 10% del parque de vehículos convencionales	100% de exoneración	100% de exoneración	100% de exoneración
Parque de vehículos eléctricos se encuentre entre el rango de 11 al 50% del parque de vehículos convencionales	50% de exoneración	50% de exoneración	50% de exoneración
Parque de vehículos eléctricos se encuentre arriba del 50% del parque de vehículos convencionales	25% de exoneración	25% de exoneración	25% de exoneración

Fuente: elaboración propia con base en la iniciativa de Ley 5526. Ley de incentivos a la importación de automóviles de energía no convencional. Congreso de la República de Guatemala. Guatemala. 15 de noviembre de 2018.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Antes de discutir los resultados es importante analizar las técnicas estadísticas de análisis de datos que se utilizaron. Es importante reiterar lo indicado en los capítulos tres y cuatro con respecto a las tolerancias utilizadas para la obtención de todos los resultados.

La proyección de despacho realizado puede incurrir en algún error estadístico y matemático en tal sentido es inevitable que el error esté presente entre la programación de operación a corto plazo para un día de demanda máxima registrada que contemple la carga requerida por el uso de los EV's y el día de demanda máxima histórica del SNI, al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019. El software NCP tiene como fin fundamental realizar despachos de generación de electricidad al mínimo costo operativo posible, si el usuario del software así lo desea, por lo que su tolerancia de convergencia está dada en kUS\$ y su tolerancia relativa de convergencia en %, para lo cual se utilizaron valores de 1 y 0.1 respectivamente.

Ambos valores fueron establecidos por el investigador, ya que pruebas previas e históricas del uso del software, además de consultas al manual del fabricante, sugieren que los valores óptimos para obtener los mejores resultados posibles y lo más apegados a la realidad, se lograban al utilizar los valores indicados anteriormente.

Con lo indicado, se evidencia que los resultados obtenidos son muy confiables y valederos, con el respaldo del fabricante del software NCP, la experiencia del investigador y, sobre todo, el hecho de que actualmente las programaciones de despacho diario que realiza el AMM son optimizadas con los valores de tolerancia mencionados. A continuación, se discutieron los resultados obtenidos para cada objetivo de la investigación:

### **5.1. Cálculo aproximado de la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos**

Se proyectó el crecimiento del parque de vehículos eléctricos de forma masiva y se identificó la demanda que sería requerida por el parque de vehículos eléctricos.

Se proyectó un modelo de crecimiento de vehículos eléctricos y se estimó el consumo promedio para cada vehículo, sumando estos valores de consumo a la demanda máxima histórica del SNI, al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019 de acuerdo con los programas de despacho diario publicados por el AMM, se utilizaron tablas de recolección de datos del parque de vehículos convencionales que se obtuvieron de la página de la SAT, con lo cual se generó un modelo de crecimiento del parque de vehículos eléctricos, de acuerdo con las características principales de los carros eléctricos que actualmente se están produciendo y comercializando en todo el mundo.

Los resultados obtenidos con respecto a la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos de acuerdo con la tabla VIII de la sección de presentación de resultados da cuenta que un 75 % del parque de vehículos eléctricos será cargado en carga lenta que representa 157.38 MW, de la misma forma un 20 % del parque de vehículos eléctricos será cargado en carga semirápida que representa 82.8 MW y por último el restante 5 % del parque de vehículos eléctricos será cargado en carga rápida que representa 28.35 MW.

De acuerdo con las tablas IX, X y XI de la sección de presentación de resultados que contienen la carga horaria total requerida por los vehículos eléctricos, podemos extraer que del horario de 22:00 a 6:00 la carga será de 157.4 MW. De lo anterior se tiene que para la hora de demanda baja del SNI la carga horaria máxima requerida por los vehículos eléctricos será de 157.4 MW. De acuerdo con el análisis de las tablas mencionadas, se tiene que de las 06:00 a las 14:00 no se registra carga demandada por los vehículos eléctricos, del horario comprendido entre las 14:00 y las 18:00 se registra una carga máxima horaria de 111.2 MW y por último analizando el horario de 18:00 a 22:00 (hora punta) se tiene que la carga máxima horaria demandada será de 82.8 MW.

Los resultados obtenidos son confiables porque están elaborados y proyectados con información de dominio público de los despachos diarios publicados en la página web del AMM y tablas de recolección de datos del parque de vehículos convencionales que se obtuvieron de la página web de la SAT.

Los resultados son replicables, toda vez que el investigador tenga acceso a la información de dominio público de los despachos diarios publicados en la página web del AMM y al inventario del parque de vehículos convencionales publicados en la página de la SAT.

El objetivo específico se alcanzó porque se logró determinar la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos.

De esta forma se concluye que el horario de mayor carga requerida debido a la recarga de los vehículos eléctricos será en hora de demanda baja lo que promueve el aprovechamiento de los recursos de generación disponibles en el SNI, lo que a su vez lleva a aplanar de la curva de demanda del SNI.

## **5.2. Impacto al sistema nacional interconectado con el uso de vehículos eléctricos**

Se determinó que el impacto que la carga requerida por el uso de los vehículos eléctricos tendría sobre el SNI, se sumó esta carga a la demanda máxima histórica del SNI. Al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019, con el apoyo de la herramienta NCP se estimó la programación de operación a corto plazo para un día de demanda máxima.

Se utilizó la tolerancia de convergencia determinada por el investigador (1kUS\$ y 0.1 %), “el modelo converge cuando la tolerancia entre la mejor solución encontrada y límite superior es menor a la tolerancia definida” (PSR, 2020).

Del programa de despacho diario se analiza lo siguiente:

El Impacto a la demanda del sistema nacional interconectado da cuenta que según la figura no. 8 y la tabla XII de la sección de presentación de resultados se tiene que el día de demanda máxima histórica del SNI. Al momento de realizar este estudio la demanda máxima histórica fue registrada el 16 de mayo de 2019, en el cual se registra una potencia de 1716.2 MW en comparación con la demanda máxima proyectada con el uso de vehículos eléctricos de 1744.5 MW, se tiene una diferencia de 28.4 MW, para el horario de potencia en punta que ocurre aproximadamente a las 19:00. De igual forma se identifica que a partir de las 22:00 a 06:00 se tiene una diferencia aproximada de 157.4 MW los cuales corresponden a la demanda generada por la carga de los vehículos eléctricos.

La capacidad instalada del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala es de 3,405.3 MW de acuerdo con la base de datos del AMM, se tiene que la demanda máxima que contemple el uso masivo de vehículos eléctricos será de 1744.5 MW, en tal sentido se tiene una diferencia de 1660.8 MW disponibles.

De igual forma de acuerdo con la figura no. 9 de la sección de presentación de resultados se identificó que la mayor diferencia del precio de oportunidad de la energía está comprendida entre las 00:00 y las 05:00 y representa una diferencia promedio de US \$40/MWH. esta diferencia se debe a que se tienen que despachar centrales de generación más costosas para abastecer la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos.

Los resultados obtenidos son confiables porque están elaborados y proyectados con información de dominio público de los despachos diarios publicados en la página web del AMM y tablas de recolección de datos del parque de vehículos convencionales que se obtuvieron de la página web de la SAT.

Los resultados son replicables, toda vez que el investigador cuente con el simulador NCP en su versión 5.22 y la base de datos del SNI del año 2019, se puede recrear el despacho del SNI que contemple la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos para un día de demanda máxima.

El objetivo específico fue alcanzado porque se determinaron los principales impactos sobre el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

Se concluye que el SNI tiene la capacidad para abastecer la energía y potencia requerida por el uso masivo de los EV's, sin embargo, en la capacidad disponible para el despacho de generación hay centrales que quedan fuera del despacho por indisponibilidades, mantenimientos, salidas forzadas, falta de combustible y por despacho económico.

Con base en los resultados obtenidos se observa que el POE aumenta con la incorporación masiva de EV's, esto se debe a que actualmente la matriz de generación no es un porcentaje altamente renovable y por lo tanto durante la hora de demanda baja se tendrían que despachar centrales de generación más costosas con el objetivo de abastecer la carga requerida por el uso masivo de EV's.

### **5.3. Incentivos para la importación de vehículos eléctricos en Guatemala**

De acuerdo con el análisis realizado a ley 9518 Ley de Incentivos y promoción para el transporte eléctrico de Costa Rica y basado en la Iniciativa en proceso de aprobación 5526 Ley de Incentivos a la importación de automóviles de energía no convencional del Congreso de la República de Guatemala, se tienen los siguientes incentivos:

- Exoneración de pago del Impuesto Aduanero a la importación
- Exoneración de pago del Impuesto al Valor Agregado (IVA)
- Exoneración de pago del Impuesto de Circulación

De acuerdo con los incentivos mínimos listados en la tabla XV de la sección de presentación de resultados, que menciona que cuando el porcentaje del parque de vehículos eléctricos represente menos del 10 % del parque de vehículos convencionales, tendrán exoneración del 100 % de los impuestos al valor agregado (IVA), impuesto de circulación e impuesto aduanero de importación.

De la misma forma analizando la tabla XV, se tiene que cuando el porcentaje del parque de vehículos eléctricos se encuentre entre el rango comprendido entre el 11 y el 50 % del parque de vehículos convencionales, tendrá una exoneración del 50 % de los impuestos al valor agregado (IVA), impuesto de circulación e impuesto aduanero de importación.

Y por último incentivo se tiene que, cuando el porcentaje del parque de vehículos eléctricos este arriba del 50 % del parque de vehículos convencionales, tendrá una exoneración del 25 % de los impuestos al valor agregado (IVA), impuesto de circulación e impuesto aduanero de importación.

Los resultados son confiables y replicables porque fueron elaborados en la base a leyes e iniciativas de ley publicados en Costa Rica y Guatemala, en tal sentido para el vecino país de Costa Rica la Ley 9518 Ley de Incentivos y promoción para el transporte eléctrico de Costa Rica, ya se encuentra regulando y promoviendo el transporte eléctrico.

El objetivo específico fue alcanzado porque se determinaron los principales incentivos que promuevan la importación y uso de los vehículos eléctricos en Guatemala.

Se determinó que para que el uso masivo de vehículos eléctricos en Guatemala sea viable y una realidad es necesario contar con incentivos mínimos que promuevan la importación, comercialización y uso de los vehículos eléctricos.

## CONCLUSIONES

1. Se identificó con base en los cálculos que la carga requerida por el uso masivo de los vehículos eléctricos tiene un punto máximo de 157.4 MW comprendido en el horario de 22:00 a 06:00 del día siguiente, en tal sentido se evidencia que con el uso masivo de vehículos eléctricos se aplanaría la curva de demanda del Sistema Nacional Interconectado y se aprovecharía la energía y potencia disponible del parque de generación disponible durante la hora de demanda baja.
2. Se identificó que el Sistema Nacional Interconectado tiene la capacidad para abastecer la energía y potencia requerida por el uso masivo de los vehículos eléctricos, sin embargo, en la capacidad disponible para el despacho de generación hay centrales que quedan fuera del despacho por indisponibilidades, mantenimientos, salidas forzadas, falta de combustible y por despacho económico, en tal sentido estas indisponibilidades generan sobre costos ya que se tendrían que despachar centrales de generación con costos altos para abastecer la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos.
3. Con base en los resultados obtenidos se observa que el el Precio de Oportunidad de la Energía aumenta con la incorporación masiva de vehículos eléctricos, esto se debe a que actualmente la matriz de generación no es un porcentaje altamente renovable y por lo tanto durante la hora de demanda baja se tendrían que despachar centrales de generación más costosas.

4. Se determinaron los incentivos mínimos que promuevan la importación, comercialización y el uso de los vehículos eléctricos, los cuales se listan a continuación: exoneración de pago del impuesto aduanero a la importación, exoneración de pago del impuesto al valor agregado y exoneración de pago del Impuesto de circulación de acuerdo con la tabla XV de la sección de presentación de resultados.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios técnicos y económicos que contemplen la inclusión de la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos para planificar la operación del Sistema Nacional Interconectado. Esta recomendación está dirigida al Administrador del Mercado Mayorista.
2. Establecer alianzas estratégicas con instituciones públicas y privadas del subsector eléctrico con el fin de realizar estudios de movilidad eléctrica para la ciudad de Guatemala, que evalúen las instalaciones de distribución con respecto a capacidades de cargabilidad, flujos de potencia, sobretensiones y puntos de recarga; y así preparar las instalaciones ante un crecimiento eventual del parque de vehículos eléctricos. Lo anterior se le recomienda a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
3. Realizar estudios de movilidad eléctrica para la República de Guatemala con el objetivo de que en estos estudios se pueda tener en cuenta la carga requerida por el uso masivo de vehículos eléctricos y que sea tomado en cuenta dentro de los planes indicativos de generación y transporte, recomendación dirigida al Ministerio de Energía y Minas.

4. Promover iniciativas de ley que incentiven la importación, comercialización y uso de vehículos eléctricos, con el objetivo principal de optimizar el uso de la potencia y energía disponibles del Sistema Nacional Interconectado y así contribuir a la disminución de gases de efecto invernadero en busca de un futuro que promueva el uso de energías renovables. Estas acciones corresponden al Ministerio de Energía y Minas, en conjunto con el Ministerio de Economía y el Ministerio de Finanzas

## REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista (AMM). (2019). *Programa de despacho diario 16.05.2019*. Guatemala: Autor.
2. Anaya, F. (2018). *Vehículos eléctricos en Guatemala, Análisis de impacto y propuesta de implementación*. Guatemala, Guatemala: Organización Lationamericana de Energía OLADE.
3. Bohórquez, A., López, C. P., Díez, A. E., & Díez, I. C. (2011). *Revisión y análisis de la normatividad actual de productos y equipos eléctricos frente a la entrada de vehículos eléctricos en Colombia*. Revista Investigaciones Aplicadas, 111-123.
4. Decreto no. 93-96. Ley General de Electricidad. Diario Oficial de Centro América. Congreso de la Republica de Guatemala. Guatemala, Guatemala. 15 de Noviembre de 1996.
5. Espina Alvarado, J. (Abril, 2017). Carga, demanda y energía eléctrica: conceptos fundamentales para la distribución de electricidad. *Sector Electricidad*, 1-3. Recuperado de <http://www.sectorelectricidad.com/17597/carga-demanda-y-energia-electrica-conceptos-fundamentales-para-la-distribucion-de-electricidad/>
6. Franco, Y. A. (5 de marzo, 2018). Estudiantes x derecho [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://estuderecho.com/sitio/?p=4961>

7. ICARE. (2019). *Automoviles electricos Chile*. Consultado el 28 de marzo de 2019. Recuperado de <https://www.icare.cl/contenido-digital/automoviles-electricos-chile/>
8. Iniciativa de Ley 5526. Ley de incentivos a la importación de automóviles de energía no convencional. Congreso de la República de Guatemala. Guatemala, Guatemala. 15 de noviembre de 2018.
9. Ley No. 9518. Incentivos y promoción para el transporte eléctrico. San José, Costa Rica. Asamblea Legislativa. 28 de Enero de 2018.
10. Mendoza, C.C., Quintero, A.M., Santamaria, F., Alarcón, J.A. (2016). *Estimación de la Energía Eléctrica Requerida por los Vehículos Eléctricos en Función de las Distancias Recorridas en una Zona Residencial. Bogotá, Colombia*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2016.21.4>
11. Merchán, M., & Medina, S. (2016). *Análisis del impacto de vehículo eléctricos en las redes de distribución del canton Cuenca. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca*.
12. Morales Quintana, B. (2014). *Modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá*. D.C. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
13. PSR. (2020). *Manual del Usuario, Modelo NCP Versión 5.22*. Brasil: Autor.

14. Superintendencia de Administración Tributaria, SAT. (2020). *Parque vehicular*. Consultado del 27 de Septiembre de 2020. Recuperado de <https://portal.sat.gob.gt/portal/parque-vehicular/>
15. Unidad de Planeación Energetico Minero. (2019). *Política Energética 2019-2050*. Guatemala, Guatemala: Ministerio de Energía y Minas, Gobierno de Guatemala.
16. Vides Sierra, J. A. (2016). *Diseño de investigación del impacto de la recarga de vehículos eléctricos sobre un circuito de distribución de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

