



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA  
NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES  
ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA**

**Carlos Daniel Cogoux González**

Asesorado por el M.A. Ing. Rony Aureliano Jucup Solís

Guatemala, marzo de 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA  
NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES  
ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CARLOS DANIEL COGUOX GONZÁLEZ**

ASESORADO POR EL M.A. ING. RONY AURELIANO JUCUP SOLÍS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MARZO DE 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
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:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 15 de noviembre de 2021.

**Carlos Daniel Cogoux González**







EEPFI-PP-0065-2022

Guatemala, 12 de enero de 2022

Director  
Armando Alonso Rivera Carrillo  
Escuela De Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Todas las áreas - Energías renovables e incidencia en la matriz energética de Guatemala**, presentado por el estudiante **Carlos Daniel Cogoux González** carné número **200614819**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestión De Mercados Eléctricos Regulados.

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

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

**RONY AURELIANO JUCUP SOLÍS**  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
COLEGIADO NO. 16,912

Mtro. Rony Aureliano Jucup Solís  
Asesor(a)

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador(a) de Maestría

Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería







EEP-EIME-0065-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Daniel Coguox González**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, enero de 2022



LNG.DECANATO.OI.224.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA**, presentado por: **Carlos Daniel Cognox González**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme tanta fortuna en la vida.
<b>Mis padres</b>	Por su amor y apoyo incondicional.
<b>Mis hermanos</b>	Lilian, Miriam, Manuel e Israel Coguo González, por su apoyo y compañía durante mi vida.
<b>Mi primo</b>	Juan Cruz González, por su valioso apoyo incondicional.
<b>Mi pareja</b>	Nicole Böwer por tanta paciencia y apoyo en mi carrera profesional.
<b>Familia y amigos</b>	Por cada experiencia dentro y fuera de la Facultad.





## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la <i>alma mater</i> que permitió nutrirme de conocimientos.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
<b>Mis padres</b>	Por el apoyo económico de día a día en mi carrera universitaria.
<b>Mis amigos</b>	Por haberme acompañado durante la carrera.
<b>Mi asesor</b>	M.A. Ing. Rony Aureliano Jucup Solís, por haberme guiado durante el trabajo de graduación.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XV
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
3.1 Descripción del problema .....	9
3.2 Formulación del problema .....	10
3.3 Delimitación del problema .....	11
4. JUSTIFICACIÓN .....	13
5. OBJETIVOS .....	15
5.1 General.....	15
5.2 Específicos .....	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	17
7. MARCO TEÓRICO.....	19
7.1. Descarbonización en el mundo.....	19
7.1.1. Compromisos.....	20

	7.1.2.	Sector energía.....	22
	7.1.3.	Sector transporte.....	23
7.2.		Matriz energética.....	23
	7.2.1.	Definición.....	24
	7.2.2.	Cálculo .....	25
	7.2.3.	Planeación a futuro .....	28
7.3.		Transporte público.....	30
	7.3.1.	Capacidad .....	31
	7.3.2.	Diversificación .....	32
7.4.		Trenes eléctricos .....	34
	7.4.1.	Tipos de trenes.....	34
	7.4.2.	Consumos de energía .....	37
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	41
9.		METODOLOGÍA .....	43
	9.1	Características del estudio .....	43
	9.2	Unidades de análisis .....	44
	9.3	Variables .....	45
	9.4	Fases del estudio .....	45
	9.4.1	Fase 1: recolección y organización de información.	46
	9.4.2	Fase 2: análisis de la capacidad de la matriz energética.....	47
	9.4.3	Fase 3: implementación de ensayos de transporte para la reducción de emisiones de dióxido de carbono .....	50
	9.4.4	Fase 4: capacidad de la matriz energética para cumplir con compromisos de descarbonización de Guatemala.....	53

9.4.5	Resultados esperados .....	54
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS .....	57
11.	CRONOGRAMA .....	59
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	61
	REFERENCIAS .....	63
	APÉNDICES .....	67



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Generación por tipo de tecnología disponible para la matriz energética de Guatemala para el año 2016. ....	26
2.	Matriz de generación eléctrica de Guatemala para 2016. ....	27
3.	Matriz de generación eléctrica de Guatemala para 2016, por generación renovable y no renovable. ....	28
4.	Diagrama de Gantt de las actividades para la realización de la investigación.....	60

### TABLAS

I.	Esquema de solución para trabajo de investigación .....	18
II.	Proyección de plantas a agregarse, según el recurso provechable, al parque de generación guatemalteco.....	30
III.	Variables del estudio de investigación .....	45
IV.	Actividades para la realización del trabajo de investigación.....	59
V.	Identificación de recursos y costos para la investigación .....	61





## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>C</b>	Capacidad de asientos del tren
<b>ECd</b>	Consumo de energía promedio para un viaje completo
<b>CA</b>	Corriente alterna
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>E</b>	Energía
<b>Es</b>	Energía consumida por asiento por kilómetro
<b>Ep</b>	Energía consumida por pasajero por kilómetro
<b>Ev</b>	Energía consumida por vehículo por kilómetro
<b>EC(t)</b>	Energía consumida variable en el tiempo
<b>ECre</b>	Energía regenerada
<b>ECre(t)</b>	Energía regenerada variable en el tiempo
<b>β</b>	Factor de pérdida del sistema de transmisión de tren
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b>GWh</b>	Giga vatio hora
<b>Hz</b>	Hercio
<b>SF<sub>6</sub></b>	Hexafluoruro de azufre
<b>HFCs</b>	Hidrofluorocarbonos
<b>h</b>	Horas
<b>=</b>	Igual que
<b>km</b>	Kilómetro
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>kV</b>	Kilovoltio
<b>d</b>	Longitud del viaje en (km)

>	Mayor que
<b>MW</b>	Megavatio
<b>MWh</b>	Megavatio hora
<	Menor que
<b>CH4</b>	Metano
<b>m</b>	Metro
<b>N2O</b>	Óxido de nitroso
∀	Para todo caso
<b>PFCs</b>	Perfluorocarbonos
%	Porcentaje
<b>P</b>	Potencia
$\alpha 01 \times \beta 1 + \alpha 02 \times \beta 2$	Potencia de cabecera de tren
<b>HEP</b>	Potencia de cabecera de tren (head-end power)
<b>P(t)</b>	Potencia en el tiempo
<b>P &lt; 0</b>	Potencia en las ruedas negativa
<b>P &gt; 0</b>	Potencia en las ruedas positiva
<b>Q</b>	Quetzales
$\sum_{i=1}^n x$	Sumatoria desde valor i al valor final n de la variable x
$\sum t$	Sumatoria total
<b>tCO2e/cápita</b>	Toneladas métricas de dióxido de carbono per cápita
<b>Ms</b>	Total de kilómetros por asiento
<b>Mp</b>	Total de kilómetros por pasajero
<b>Mv</b>	Total de kilómetros por vehículo
<b><math>\alpha 02</math></b>	Variable de inicio de movimiento
<b><math>\alpha 01</math></b>	Variable de movimiento
<b><math>\beta 1</math></b>	Variable ficticia 1
<b><math>\beta 2</math></b>	Variable ficticia 2
<b>W</b>	Vatio
<b>V</b>	Vehículo

## GLOSARIO

<b>Acuerdo de París</b>	Tratado internacional que tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza.
<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista, operador del sistema eléctrico nacional de Guatemala.
<b>Calentamiento global</b>	Incremento de la temperatura de la atmósfera terrestre asociado en parte a la emisión de gases de efecto invernadero.
<b>Cambio climático</b>	Cambio previsible en el clima terrestre provocado por la acción humana que da lugar al efecto invernadero y al calentamiento global.
<b>Capacidad</b>	Potencia total disponible en la Matriz Energética.
<b>Cargas</b>	Potencia que necesita un dispositivo, sistema, sector, o región de la red eléctrica.
<b>Combustible fósil</b>	Fuente de energía disponible en la tierra, no abundante ni renovable.

<b>Consumo</b>	Potencia que requiere una carga eléctrica, dispositivo, sector, o región de la red eléctrica en determinado tiempo.
<b>Demanda</b>	Potencia que requiere una carga eléctrica, dispositivo, sector, o región de la red eléctrica.
<b>Dióxido de carbono</b>	Gas, formado de un átomo de carbono y dos de oxígeno, que se produce en las combustiones y que es uno de los principales causantes del efecto invernadero.
<b>Demanda</b>	Potencia que necesita un dispositivo, sistema, sector, o región de la red eléctrica.
<b>Dirección General de Transporte</b>	Ente rector del transporte extraurbano en Guatemala.
<b>Eficiencia</b>	Capacidad de aprovechar al máximo la conversión de un proceso a otro.
<b>Electricidad</b>	Término empleado para referirse a la forma de energía basada en la electricidad.
<b>Energía</b>	Capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo.
<b>Energía eléctrica</b>	Forma de la energía que se conoce como electricidad.

<b>Energía renovable</b>	Se refiere a la energía que se genera a partir de una fuente abundante de recursos, como la luz solar, el viento, el agua, el calor interno.
<b>Frenado regenerativo</b>	Sistema de frenado en trenes eléctricos que es capaz de recuperar la energía del proceso de frenado, para utilizarse inmediatamente o almacenarse hasta que se necesite.
<b>Fuentes renovables</b>	Recursos abundante en la tierra, que después de su uso se renueva para seguir siendo aprovechado.
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero, son los gases que alteran el clima de la Tierra al absorber energía de la atmósfera inferior y volver a emitirla.
<b>Generación de energía</b>	Convertir la energía de cualquier tipo a electricidad.
<b>HEP</b>	Head-end power, traducido al español como potencia de cabecera para un tren eléctrico.
<b>Impedancia</b>	Parámetro eléctrico resultante de todos los parámetros eléctricos intrínsecos de un sistema eléctrico.
<b>Matriz energética</b>	Representación cuantitativa de toda la energía disponible en un determinado territorio, región, país, o

continente para ser utilizada en los diversos procesos productivos.

<b>MEM</b>	Ministerio de Energía y Minas de Guatemala
<b>NDC</b>	Nationally Determined Contribution, que en español se ha traducido como Contribuciones determinadas a nivel nacional.
<b>NTD</b>	National Transit Database, de Chicago, Estados Unidos, en español se traduce como base de datos de tránsito nacional.
<b>NTGDR</b>	Norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación renovable.
<b>ONU</b>	Organización de Naciones Unidas.
<b>Parámetros</b>	Conjunto de características intrínsecas de la construcción de los sistemas eléctricos.
<b>Per cápita</b>	Por cabeza, por cada individuo.
<b>Plan Nacional de Energía 2017-2032</b>	Documento elaborado por el MEM con el fin de cumplir con los objetivos establecidos en la Ley Marco de cambio climático.

<b>Política Energética 2019-2050</b>	Documento elaborado por el MEM con el fin Fijar los lineamientos de largo plazo que permitan garantizar el suministro de los requerimientos energéticos futuros de forma sostenible y a precios competitivos.
<b>Potencia</b>	Resultado de dividir el cuadrado de la tensión, de un sistema de demanda, dentro de su impedancia que es conformada por los parámetros eléctricos intrínsecos del mismo sistema de demanda.
<b>Potencia de cabecera</b>	Potencia que necesita un tren eléctrico en posición estática justamente antes de moverse.
<b>Sostenibilidad</b>	Cualidad para un proyecto de desarrollo que contempla al sector ecológico, social y económico.
<b>Subsector eléctrico</b>	Es el encargado del suministro de energía eléctrica en condiciones óptimas de seguridad, calidad y precio.
<b>Tensión</b>	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en voltios.
<b>Vatio</b>	Unidad de medida de potencia.
<b>Viabilidad</b>	Cualidad para un proyecto de desarrollo que contempla al sector ecológico y económico.





## RESUMEN

La persistencia de emisiones de dióxido de carbono en el transporte público guatemalteco ha sido un problema sin resolver en más de un siglo, aun cuando se cuenta con las tecnologías disponibles en el mercado. Por esa razón con este estudio se pretende mostrar que una diversificación del transporte público, incorporando trenes eléctricos, puede aportar en gran medida, a cumplir con los compromisos de Guatemala ante el acuerdo de París, de minimizar las emisiones gases de efecto invernadero, buscando proyectos de desarrollo sostenible para el país.

La ruta de ensayo para el sistema de trenes de este estudio es Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala, y con la recopilación de datos como cantidad de transporte, frecuencia de uso, cantidad de usuarios, capacidad de la matriz energética, cantidad de emisiones de dióxido de carbono del sector transporte y eléctrico, compromisos de la Contribución Nacional Determinada de Guatemala (NDC, por sus siglas en inglés), y los cálculos de consumo de energía eléctrica del sistema de trenes, es posible comprobar la capacidad de la matriz energética en diferentes escenarios planteados, y al mismo tiempo evaluar los niveles de emisiones de dióxido de carbono del sector eléctrico con una matriz renovable y el sector transporte diversificado.

Las comprobaciones de la capacidad de la matriz energética, se trabaja con base en ecuaciones y desigualdades comparativas con la demanda y consumos del sistema de trenes eléctricos. Y el cumplimiento del compromiso del NDC, reducciones en las emisiones de dióxido de carbono, se compara contra

la cantidad de emisiones reducidas por el reemplazo del transporte convencional en la ruta de ensayo.

# 1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación se torna en distintos escenarios de la matriz energética de Guatemala ante la diversificación del transporte público con trenes eléctricos en la ruta ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala. La evaluación de diversificar el transporte público en Guatemala permite observar cuánto puede aportar este sector al plan nacional de energía, en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, tomando tan solo una ruta como ensayo.

Si se analiza el contexto nacional, desde el punto de vista de la producción de la fuente de energía, Guatemala no es un productor del combustible que necesita el transporte convencional actual, sin embargo, sí se puede afirmar que Guatemala es productor de la energía eléctrica que se necesita para abastecer los consumos de todos los sectores que demandan la electricidad. Por tal razón, se propone evaluar a la matriz energética en diferentes escenarios tanto de producción de energía como de consumo del sistema de trenes.

Para abordar el tema de investigación, primero se hace un breve acercamiento a los puntos teóricos relacionados con la matriz energética, teoría de consumos de energía de trenes eléctricos, teorías para dimensionar la capacidad del transporte y su diversificación, y otros temas relacionados con los compromisos de descarbonización por parte de Guatemala, los fundamentos teóricos son debidamente citados y ampliados para su búsqueda en la sección de referencias.

Vale la pena mencionar que el estudio es cuantitativo, con alcance descriptivo y no experimental, por lo que, en la fase de recolección y organización

de información, se muestran los datos recopilados de las diferentes fuentes de información para ser tratados directamente en las siguientes fases.

En la fase de análisis de la capacidad de la matriz energética, se podrá determinar la cantidad de trenes eléctricos que es capaz de soportar la matriz energética sin comprometer la demanda de otros sectores de consumo.

Y en la siguiente fase, la de implementación de ensayos de transporte para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, se podrá determinar la cantidad de trenes eléctricos que son necesarios implementar, para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en Guatemala, en línea con los números al que se ha comprometido Guatemala en su Contribución Nacional Determinada.

Se propone una sección de técnicas de análisis de información, en donde se identifican estrategias para la organización de información, y técnicas matemáticas para encontrar la asociación entre las variables a comparar, y así obtener los resultados buscados. Más adelante se plantean una lista de actividades generales con las que se plantea la factibilidad de tiempo y económica.

Con las estrategias anteriores, se propone estructurar la investigación en cuatro capítulos de contenido, en el primero se buscará presentar un marco referencial, seguido del capítulo de fundamentos teóricos, para luego abordar el capítulo tres que tratará del desarrollo de la investigación, donde se usarán todas las técnicas y análisis planteados en este diseño de investigación, y en el último capítulo se buscará presentar y discutir los resultados obtenidos de la investigación.

Para todo trato teórico y cada fase del estudio, es necesario evidenciar la existencia de los estudios previos que validan las variables a tratar, y fundamenten la base de la investigación con argumentos sólidos, estos se encuentran en la siguiente sección de antecedentes.



## 2. ANTECEDENTES

La descarbonización del planeta por medio de la matriz energética ha sido a estrategia adoptada por varios países, pero no ha sido suficiente en las últimas décadas. Primero, porque la eficiencia de algunas tecnologías de fuente renovable no había sido la mejor, aunque ha ido mejorando, pero para lograr una limpieza más allá de lo alentador, se debe involucrar a todos los países con este compromiso e ir más allá del sector eléctrico, e integrar a otros sectores como el sector transporte, industria, entre otros. Y, sobre todo, trabajar en cambiar las formas de actuar en relación con los consumos y la forma de transportarse, según (Goldemberg y Tadeo, 2010).

Para conocer y aplicar alguna metodología de cálculo de consumos de energía de trenes, es conveniente conocer los estudios que se han realizado para este fin, como los que se plantean a continuación:

Diversificar las tecnologías en el subsector transporte para descarbonizar al planeta, es igual de importante como conocer la eficiencia de las diferentes tecnologías que existen disponibles en el mercado, principalmente de trenes eléctricos.

Con este estudio es posible conocer la eficiencia, ventajas y el impacto de los consumos demandados a la matriz energética por trenes eléctricos de alta velocidad que propone un modelo actualizado de consumo de alta velocidad, que evaluar el modelo mediante la identificación de los parámetros del tren y la medición de los consumos de energía en más de cien líneas ferroviarias, como lo indican (Vandanjon, Bosquet, Coiret, y Gautier, 2016).

Otra tecnología disponible de trenes es la energía de tracción, que es el componente principal de la energía de explotación ferroviaria, con este estudio que toma en cuenta los horarios de operación de los trenes, se tendrá un punto de vista desde otra perspectiva para evaluar los consumos de energía por los trenes, y así además de estudiar los consumos también será posible proponer horarios que apoyen a optimizar los consumos demandados a la matriz energética.

El estudio de este artículo propone utilizar los datos reales de explotación de la línea de alta velocidad Beijing-Shanghai, un lugar con alta experiencia en este tipo de transporte, según el estudio propuesto por (Zhang, Jia, Wang, y Xu, 2019). Experiencia que puede ser aprovechada para este estudio propuesto.

Otro interesante e importante punto de vista para tomar en cuenta dentro del análisis, es el punto de vista electromecánico impactando a la carga eléctrica planteado en el artículo en donde indica Pinzón y Herrera (2009) “sigue una metodología electromecánica de estimación de la demanda eléctrica para sistemas férreos, aplicada a trenes de cercanía, usando modelos parametrizables para las horas de alta y baja demanda del sistema” (p1).

También se aclara como se determinan los consumos en relación con la cantidad de pasajeros:

Una vez estimado el consumo de una línea de tren de cercanías en función del número de trenes y pasajeros que circulan por la ruta, se presenta el análisis e impacto de la carga eléctrica necesaria para la locomoción de este sistema férreo en un sistema de distribución plenamente desarrollado, tal como en los centros urbanos de Colombia, en el que se introduce tal sistema de transporte. (Pinzón y Herrera, 2009, p. 1)



Acerca de la demanda de energía del sistema por unidad, se aclara que se analiza como un sistema.

Se asume como sistema de distribución de prueba el sistema IEEE de 118 nodos, sobre el cual se define la ruta del tren dentro, los puntos de conexión al sistema eléctrico de distribución. Después de calculada la demanda eléctrica estimada del sistema de tren de cercanías, se realizan análisis de flujo de carga y de cortocircuito trifásico para determinar el impacto sobre el sistema en régimen permanente. (Pinzón y Herrera, 2009, p. 1)

Otro modelo de consumos de energía para trenes eléctricos es tomar en cuenta a los trenes que cuentan con una eficiencia de frenado regenerativo instantáneo con apoyo de un sistema de modelación de carriles. Con el apoyo de este artículo que toma los datos de Portland, Oregón y se valida con datos de Chicago, Illinois comparando las predicciones del modelo con las estimaciones de la National Transit Database (NTD).

Además, según el resumen inicial de este artículo, se demuestra que el enfoque de modelización propuesto es capaz de captar las diferencias en el consumo de energía asociadas a los parámetros del tren, la ruta y las operaciones, y por ello es conveniente tomar en cuenta los puntos de vista y resultados del artículo de (Rakha, 2017).

Además de conocer las tecnologías de transporte, es importante conocer la demanda de transporte y su frecuencia de uso para poder dimensionar el tipo de transporte y la cantidad de unidades a implementar en una ciudad o ruta. Con esta bibliografía se pretende aprovechar las experiencias que expone el siguiente libro de texto, para la implementación de transporte público, y aumentos de este,

según demanda y crecimiento poblacional a largo plazo, ya que cuenta con capítulos específicos sobre el transporte público rural y el sector de las largas distancias en Inglaterra.

Además de abordar temas de la tecnología de los sistemas de autobuses y ferrocarriles con especial referencia a la capacidad máxima y el consumo de energía. En la introducción del texto también indica que los principios y conclusiones, en general, también son aplicables a países con ingresos per cápita y densidad de población similares, según (White, 2017).

Para evaluar los consumos actuales, las tendencias de energía, y la robustez de la matriz energética ante las políticas asumidas por los gobiernos, es necesario analizar los desafíos a los que se enfrentará la matriz energética ante proyectos de movilidad eléctrica, principalmente ante proyectos de transporte masivo, como trenes eléctricos. Los modelos para el cálculo de consumos demandados a la matriz energética son de suma importancia para este trabajo de graduación, según las consultas con las publicaciones de (Chicojay, 2010; Vasquez, 2018; Rúa, Arango y Larsen, 2017).

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Aún no ha sido posible realizar una diversificación en el transporte público, involucrando trenes eléctricos ante la persistencia de emisiones de CO<sub>2</sub> por los motores de combustión desde hace más de un siglo, aun cuando los trenes eléctricos ya existen desde hace varios años, y además estos motores toman la fuente de energía de los combustibles que no son producto generado en Guatemala.

#### **3.1 Descripción del problema**

La matriz energética planteada en El Plan Nacional de Energía 2017 – 2032 del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala pretende minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, aprovechando los recursos renovables para la generación de energía eléctrica, diversificando así la matriz energética. Sin embargo, es importante considerar que el subsector transporte ha sido el responsable del 50 % del total de las emisiones de dióxido de carbono en el 2016, y el subsector eléctrico ha sido el responsable del 32 % del total, según los datos presentados en este mismo plan de energía.

Por lo que es conveniente contemplar una diversificación de las tecnologías en el subsector transporte, tal como los trenes eléctricos que emiten cero toneladas de dióxido de carbono al medio ambiente; tomando la energía que necesitan para su operación de fuentes renovables, tal como lo plantea el Plan de Energía del MEM. Sin embargo, vale la pena analizar que la supuesta matriz energética pueda soportar dicha diversificación en la tecnología de transporte, sin comprometer la demanda de otros sectores. Para este análisis se propone la

diversificación en la ruta ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, por ser una ruta turística y de alta recurrencia en el país.

### **3.2 Formulación del problema**

#### Pregunta central

¿Cuál es capacidad de la matriz energética en los diferentes escenarios planteados en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM para soportar una diversificación de tecnología en el transporte público que involucra trenes eléctricos en la ruta de ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala?

#### Preguntas auxiliares

- ¿Qué cantidad de trenes eléctricos deben integrarse al transporte público en la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala para que pueda ser soportado por la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM?
- ¿Qué cantidad de trenes eléctricos deben integrarse al transporte público en la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala para que Guatemala pueda cumplir, en el sector transporte, con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada?
- ¿Qué acciones deben tomarse en cuenta para que la matriz energética Proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM pueda soportar la cantidad de trenes que Guatemala necesita para cumplir con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada?

### **3.3 Delimitación del problema**

Para analizar a la matriz energética en cuanto a robustez y capacidad de soportar cargas adicionales en el transporte público, se tomarán en cuenta los parámetros eléctricos de un tipo de tren eléctrico para calcular sus pérdidas, consumos máximos y mínimos de energía. Y con la cantidad de trenes eléctricos para cubrir la necesidad de transporte en la ruta ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, se calculará la demanda total que debe sumarse a la demanda energética proyectada en el plan de energía 2017- 2032.

Y para analizar la reducción de emisiones de CO2 al medio ambiente, se tomará en cuenta el aumento de la necesidad de transportarse en esta ruta, que debe cubrirse con los trenes eléctricos, soportado por la matriz energética del plan de energía 2017- 2032.



## 4. JUSTIFICACIÓN

La línea de investigación en la que se presenta el tema propuesto para la tesis de Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados es en; Energías Renovables, en Análisis y Tendencias en la Matriz Energética Nacional, Regional y Global, porque se busca evaluar los comportamiento y capacidad de una matriz energética, con un alto porcentaje de tecnologías de fuentes renovables, ante la necesidad de otros sectores, de adaptar tecnologías eléctricas de alto consumo para sus estrategias de descarbonización.

Con este estudio se pretende apoyar al Gobierno Central de Guatemala, dando una alternativa que puede evaluarse en el Subsector Transporte, que aporten a las estrategias por cumplir los compromisos que ha adquiridos ante la Organización de Naciones Unidas por descarbonizar al medio ambiente, soportado por una matriz energética sostenible. La investigación también puede beneficiar al Ministerio de Energía y Minas, en cuanto a la observación de cambios paulatinos y bruscos en los consumos demandados a la matriz energética 2017-2032, por parte del Subsector Transporte.

Por los motivos políticos mundiales y la necesidad de la sociedad guatemalteca de un ambiente sano y más alternativas de movilidad, es importante analizar una diversificación en el transporte público, involucrando trenes eléctricos ante la persistencia de emisiones de CO<sub>2</sub> por los motores de combustión, pero también es importante reconocer, que no se conoce la tendencia en los consumos de energía eléctrica por parte de este tipo de transporte, y tampoco se conocen los desafíos al que se vería enfrentado el sistema eléctrico nacional.

Sumando a este escenario, que por parte del subsector eléctrico se plantea diversificar la matriz energética 2017 - 2032, involucrando tecnologías de generación de fuente renovable, para descarbonizar al medio ambiente, y con ella soportar la creciente demanda hasta el último año, y que en Guatemala ya se está evaluando la viabilidad de proyectos de movilidad eléctrica en el transporte público.

Es necesario evaluar el comportamiento de la matriz energética planteada, adicionando la demanda de energía por parte de trenes eléctricos en una sola ruta, para que se puedan sugerir las acciones necesarias, anticipadamente, ante un escenario que pueda comprometer el suministro de energía para los demás sectores de consumo.



## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 General**

Evaluar la capacidad de los diferentes escenarios de la matriz energética al 2032, ante la demanda de cargas de trenes eléctricos en la ruta de ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala que aportan al plan de descarbonización.

### **5.2 Específicos**

- Determinar la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público de la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, que puede soportar la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM.
- Determinar la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público de la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, para que Guatemala pueda cumplir, en el sector transporte, con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada.
- Identificar las acciones que deben tomarse en cuenta para que la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM pueda soportar la cantidad de trenes que Guatemala necesita para cumplir con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada.



## **6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

En Guatemala aún persisten las emisiones de CO<sub>2</sub> desde el sector del transporte público, que aún no ha diversificado sus tecnologías, específicamente en su fuente de energía, actualmente todo el transporte público depende de la fuente de energía que proviene de combustibles fósiles.

Con este trabajo de graduación se pretende abordar las acciones necesarias para que Guatemala cumpla con sus compromisos, de manera estratégica, con el acuerdo de París. Con las conclusiones a determinar en este estudio, se pretende identificar las necesidades energéticas que trae consigo la diversificación el transporte público, para lograrlas cubrir con una matriz energética diversificada, con fuentes de energía renovables, que soporte todo el proceso del transporte público, desde su generación de energía hasta su uso, y así lograr que sea completamente limpio y amigable con el medio ambiente.

El estudio de graduación se abordará desde el sector energético, específicamente desde la matriz energética, ya que será la fuente de energía para el transporte público eléctrico, y por lo tanto, es importante determinar si es capaz de cumplir con la capacidad de cubrir las demandas de energía que tendrán en el futuro desde los diferentes sectores de consumo.

Los escenarios de la matriz energética a valorar serán el caso base inicial 2016, el actual 2021 y el planteado a 2032. Y el modelo de transporte que se pretende ensayar, como consumos de energía, son los trenes eléctricos con tecnología de frenado regenerativo, dado que son los más eficientes del mercado y se pretende evaluar los escenarios de alta eficiencia de consumo de energía.

Y el escenario a valorar para determinar, cantidad, necesidad y frecuencia de uso será la ruta de Antigua Guatemala a la ciudad de Guatemala.

Tabla I. **Esquema de solución para trabajo de investigación**

No.	Fase	Metodología	Tiempo estimado
1	Recopilación de información	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Recopilación de datos de la matriz energética</li> <li>2. Recopilación de datos de emisiones de CO2 de transporte público</li> <li>3. Recopilación de información de uso y frecuencia de transporte público en ruta Antigua Guatemala -ciudad de Guatemala</li> <li>4. Investigación de cálculos de consumos de energía de trenes eléctricos.</li> </ol>	2-3 semanas
2	Realización de cálculos base, observación y análisis	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cálculo de consumos de energía del sistema de transporte de energía de trenes eléctricos seleccionado como ensayo para el trabajo de investigación.</li> <li>2. Comparación entre consumos de energía de sistema de transporte necesario contra la capacidad de la matriz energética de Guatemala, para los diferentes ensayos de cantidad de trenes en el sistema de transporte público y los escenarios 2016, 2021 y 2032 de la matriz energética.</li> <li>3. Cálculo de la reducción de emisiones de CO2 por la diversificación de transporte en la ruta.</li> </ol>	10-12 semanas
3	Identificación de resultados	Evaluación y análisis de la capacidad de matriz energética en diferentes escenarios, determinando las acciones necesarias para que pueda cubrir la demanda de energía de los diferentes sectores.	3-4 semanas
4	Conclusiones	Análisis de resultados de cálculos de cada uno de los ensayos de la cantidad de trenes eléctricos en el sistema de transporte, y los diferentes escenarios de la matriz energética con sus aportes de descarbonización.	2-3 semanas

Fuente: elaboración propia.

## **7. MARCO TEÓRICO**

A continuación, se presenta importante información y conceptos teóricos que serán de apoyo para el desarrollo del trabajo de investigación.

### **7.1. Descarbonización en el mundo**

La descarbonización es la acción de reducir las emisiones al medio ambiente de dióxido de carbono que una sociedad produce por satisfacer sus necesidades con un bien o servicio, según (Sun, 2003).

La descarbonización es una estrategia que están adoptando los países comprometidos con la Organización de Naciones Unidas (ONU) en el acuerdo de París, para reducir el calentamiento global, según (Goldemberg y Tadeo, 2010)

El Acuerdo de París es el tratado internacional que “tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza” (Naciones Unidas, 2015, p. 3), según se establece en su artículo 2.

Es importante mencionar que el CO<sub>2</sub> es parte del grupo de los gases de efecto invernadero (GEI), que son los gases que alteran el clima de la Tierra al absorber energía de la atmósfera inferior y volver a emitirla. Algunos de ellos son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), los hidrofluorocarbonos (HFCs), el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y los perfluorocarbonos (PFCs) entre otros, de acuerdo con (Montzka, Dlugokencky, y Butler, 2011).

### **7.1.1. Compromisos**

En el año 2020, los países comprometidos con la ONU bajo El Acuerdo de París debieron presentar sus planes de acción climática conocidos como contribuciones determinadas a nivel nacional (nationally determined contributions, NDC), ya que “El Acuerdo de París pide a cada país que esboce y comunique sus acciones climáticas posteriores a 2020, conocidas como sus contribuciones determinadas a nivel nacional.” (Naciones Unidas, 2021, p. 3).

La definición de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, lo define la ONU como:

Las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC por sus siglas en inglés) son el núcleo del Acuerdo de París y de la consecución de esos objetivos a largo plazo. Las contribuciones determinadas a nivel nacional encarnan los esfuerzos de cada país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático. (Naciones Unidas, 2021, p. 2)

Por otro lado, la decisión y estrategia que están tomando los países comprometidos con la ONU, es la descarbonización en los sectores energía y transporte. En el sector energía, se ha adoptado la estrategia de la diversificación de la matriz energética, adoptando tecnologías de fuentes renovables para aportar con la descarbonización, de acuerdo con (Goldemberg y Tadeo, 2010).

Y para el subsector transporte, el reto de descarbonización parece aún más grande, se plantea también una diversificación con combustibles menos contaminantes e incluso amigables con el ambiente, pero con pocos estudios que demuestren su eficiencia, abundancia y tecnologías indisponibles. Sin embargo,

en la diversificación también existe la opción de motores eléctricos y otras tecnologías de transporte que tienen como fuente la energía eléctrica, como los trenes eléctricos.

De estas alternativas ya existe experiencia en países desarrollados, y estudios que indican que puede ser de impacto positivo en todos los sectores, pero se debe tener en cuenta que, de la mano de esta vía de diversificación del transporte, debe ir una transición energética que soporte el transporte eléctrico, y conviva con el objetivo de descarbonizar el medio ambiente, como lo indican (De Blas, Mediavilla, Capellán, y Duce, 2020).

En el caso de Guatemala, según la Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional “Guatemala contribuye con menos del 0.1 % de las emisiones mundiales y sus emisiones son 2.48 tCO<sub>2</sub>e/cápita, al año 2005 cifra considerablemente menor al promedio de las emisiones per cápita de la región de Latinoamérica y el Caribe (4.6 tCO<sub>2</sub>e/cápita)” (Gobierno de Guatemala, 2014, p. 4).

Según el enfoque metodológico de la Contribución Nacional Determinada de Guatemala “señala que en el período 1990-2005 el país ha tenido un crecimiento de emisiones promedio correspondiente a 0.90 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por año” (Gobierno de Guatemala, 2014, p. 5).

También se indica que “en el último inventario, disponible en el año base 2005, muestran que el país emitió un total de 31.45 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente” (Gobierno de Guatemala, 2014, p. 5).

Según los datos anteriores se aplicó “el crecimiento tendencial del período 1990-2005 a las emisiones base del año 2005, se proyectó una emisión total para

el año 2030 de 53.85 millones de toneladas de CO2 equivalente” (Gobierno de Guatemala, 2014, p. 5). Y con el dato de 53.85 millones de CO2 se realizan los cálculos para el NDC que presenta Guatemala.

En el resumen cuantificable de Aspiración del NDC, Guatemala presenta dos propuestas, *Propuesta no condicionada* y *Propuesta condicionada*.

Para la propuesta no condicionada, “Guatemala planifica lograr una reducción del 11.2 % de sus emisiones GEI totales del año base 2005 proyectado al año 2030” (Gobierno de Guatemala, 2014, p. 6).

Para la propuesta condicionada, “plantea una reducción más ambiciosa que la anterior, de hasta el 22.6 % de sus emisiones GEI totales del año base 2005 proyectado al año 2030” (Gobierno de Guatemala, 2014, p. 6).

### **7.1.2. Sector energía**

La descarbonización en el sector energía es una de las estrategias que están adoptando la mayoría de los países a nivel mundial, y Guatemala no es la excepción, ya que en el que en el mismo NDC, presenta el plan de mitigación en su capítulo 5.1, específicamente para el sector energía, indica que la matriz energética debe diversificarse, aumentando el aprovechamiento de las tecnologías de generación con fuentes renovables, buscando que en el año 2030, el 80 % de la matriz energética sea de tecnologías de fuentes renovables, según se indica en la publicación de (Gobierno de Guatemala, 2014).

También se menciona la política energética 2013-2027, la ley de Incentivos para la implementación de proyectos de generación de energía por fuentes renovables, y así como la implementación de la “Norma técnica para la



conexión, operación, control y comercialización de la generación renovable – NTGDR- y los usuarios auto-productores con excedentes de energía” (Gobierno de Guatemala, 2014, p. 12).

### **7.1.3. Sector transporte**

Para el sector transporte, en el NDC de Guatemala no se han presentado datos de proyección para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, como se indica claramente en el sector energético, Sin embargo, sí se indican algunas acciones de mitigación, que textualmente son:

Subsector transporte: implementación y mejora del sistema Transmetro (BRT por sus siglas en inglés) actualmente en operación en la ciudad de Guatemala. Además, se impulsará una normativa para establecer un programa de incentivos fiscales y subsidios enfocados en el uso de energías limpias para el transporte público y privado, incluyendo normativa para regular las emisiones de GEI en el transporte público colectivo e individual según expresa el Artículo 21. (Gobierno de Guatemala, 2014, p. 12)

## **7.2. Matriz energética**

La generación de energía eléctrica proviene de la transformación de diferentes formas de energía, en su mayoría cinética rotacional, entre otras.

Existen varias fuentes para generar energía, algunas amigables con el medio ambiente y otras que definitivamente contaminan el medio ambiente.

### **7.2.1. Definición**

Según la Política Energética 2019-2050, en la sección de Definiciones, indica que Matriz energética es la “Representación cuantitativa de toda la energía disponible en un determinado territorio, región, país, o continente para ser utilizada en los diversos procesos productivos” (Ministerio de Energía y Minas, 2019, p. 15).

Una matriz energética es compuesta por la participación de diferentes tecnologías para la generación de energía, y pueden clasificarse de diferentes maneras, sin embargo, para el trabajo de graduación vale la pena definir los grupos en los que se estará trabajando, tecnologías con fuente de generación renovable, no renovable y amigables con el medio ambiente.

Las tecnologías con fuente de generación renovable, también conocidas como energías renovables, se refiere a la energía que se genera a partir de una fuente abundante de recursos, como la luz solar, el viento, el agua, el calor interno de la tierra y la biomasa, como lo indica (Stanley, 2001). Las energías no renovables son justamente lo contrario, se refiere a la energía que se genera a partir de una fuente de recursos escasa y que no se renueva, tal es el caso de los combustibles fósiles.

Las tecnologías de la matriz energética de Guatemala por tipo de recurso son: carbón, bunker, diesel, biogás, biomasa, geotérmica, hidroeléctrica, solar y eólica, según el (Ministerio de Energía y Minas, 2017).

### **7.2.2. Cálculo**

Una matriz energética es la capacidad total de generación de energía de una región. La suma de todas las capacidades de generación de energía de cada uno del centro de generación disponibles nos da como resultado la capacidad total de generación de la matriz energética, según (Breeze, 2019).

Una matriz energética conformada por diversas tecnologías que aprovechan diferentes fuentes de energía para la generación de electricidad asegura la cobertura del servicio demandado por una región, como indica (Dincer y Zamfirescu, 2014).

Los combustibles fósiles, combustibles nucleares y recursos renovables, son las tres fuentes de energía disponibles para generar electricidad. Algunas tecnologías para la generación de energía son por combustibles fósiles, por combustible alternativo como la biomasa, biogás e Hidrogeno, por ciclos combinados como ciclos de vapor, ciclos de gas, combinados de ciclos de vapor y gas, hidro gas, por energía nuclear, por recursos renovables como Solar por radiación, solar térmica, eólico, geotérmica, por biomasa, actividad marítima, de acuerdo con (Dincer y Zamfirescu, 2014).

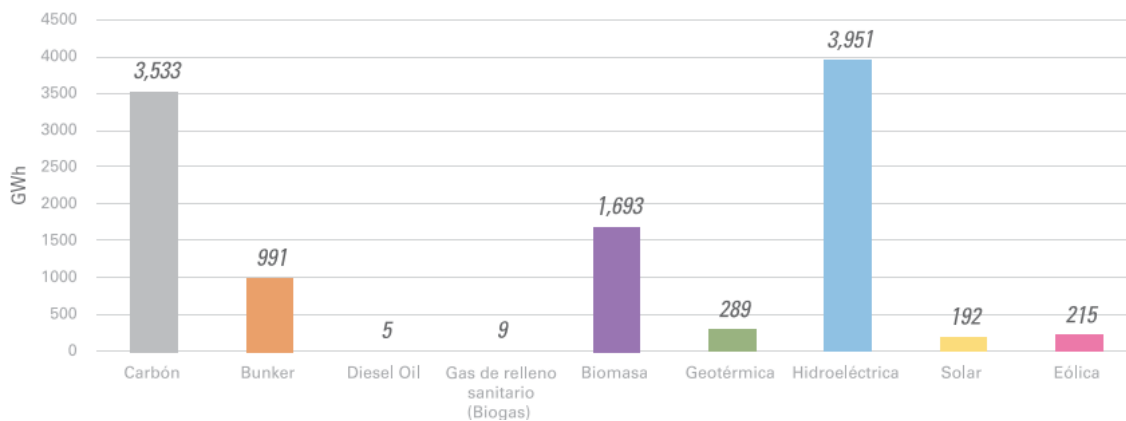
El cálculo de la matriz energética no es más que la suma de las capacidades de cada una de las tecnologías mencionadas anteriormente, siempre que sea parte del sistema de generación.

La matriz energética de Guatemala usa dos fuentes de energía disponibles de la tierra, combustibles fósiles y recursos renovables. Las tecnologías de generación con las que cuenta la matriz energética guatemalteca son, carbón, bunker, Diesel, gas de relleno sanitario (biogás), biomasa, geotérmica,

hidroeléctrica, solar y eólica, según el Plan Nacional 2017-2032 del (Ministerio de Energía y Minas, 2017).

De acuerdo con este mismo plan del Ministerio de Energía y Minas, (2017), la generación por cada tipo de recurso para el año 2016 fue como se muestra en la siguiente Imagen:

Figura 1. **Generación por tipo de tecnología disponible para la matriz energética de Guatemala para el año 2016**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2017). *Plan nacional de energía 2017-2032*.

El cálculo para esta matriz energética queda de la siguiente manera:

$$Matriz\ Energética = \sum_{i=1}^n Capacidad\ enética\ por\ tecnología \quad (1)$$

Tomando como base la ecuación anterior, en términos propios de los datos de Guatemala queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \text{Matriz Energética de Guatemala (año 2016)} \\
 & = \text{Capacidad de Carbon} + \text{Capacidad de Bunker} \\
 & + \text{Capacidad de Diesel} + \text{Capacidad de Biogás} \\
 & + \text{Capacidad de Biomasa} + \text{Capacidad de Geotérmica} \\
 & + \text{Capacidad de Hidroeléctrica} + \text{Capacidad de Solar} \\
 & + \text{Capacidad de Eólica}
 \end{aligned} \tag{2}$$

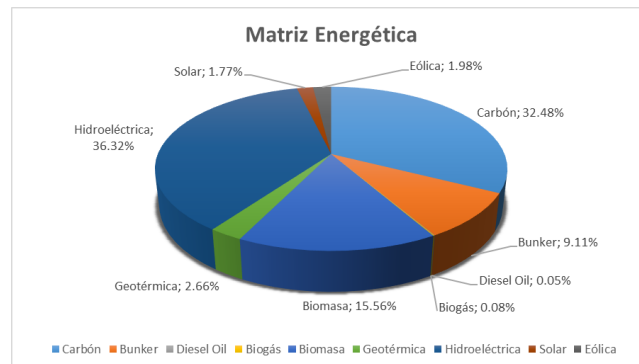
Tomando los valores de la 1, y sustituyéndolos en la ecuación anterior, La matriz energética de Guatemala queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \text{Matriz Energética de Guatemala (año 2016)} \\
 & = 3,533 \text{ GWh} + 991 \text{ GWh} + 5 \text{ GWh} + 9 \text{ GWh} \\
 & + 1,693 \text{ GWh} + 289 \text{ GWh} + 3951 \text{ GWh} + 192 \text{ GWh} \\
 & + 215
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\text{Matriz Energética de Guatemala (año 2016)} = 10,878 \text{ GWh} \tag{4}$$

Con estos datos es posible graficar la matriz energética, y queda de la siguiente manera:

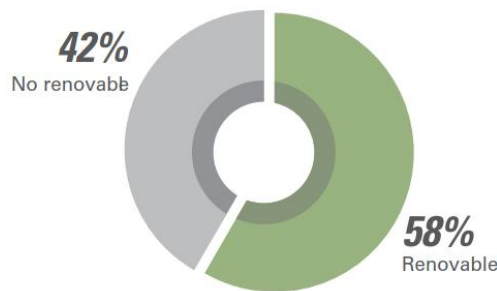
Figura 2. **Matriz de generación eléctrica de Guatemala para 2016**



Fuente: elaboración propia, empleando información del Ministerio de Energía y Minas.

En el plan Nacional de Energía 2017-2032 del Ministerio de Energía y Minas, (2017), se plantea la matriz energética en dos grandes grupos, renovable y no renovable, tomando en cuenta que las tecnologías de generación renovable son biomasa, geotérmica, hidroeléctrica, solar y eólica, la matriz energética publicada por el MEM queda de la siguiente manera:

Figura 3. **Matriz de generación eléctrica de Guatemala para 2016, por generación renovable y no renovable**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2017). *Plan nacional de energía 2017-2032*.

### 7.2.3. Planeación a futuro

La diversificación de la Matriz Energética, generación eléctrica con potencial geotérmico, adición de generadores distribuidos renovables y plantas, usuarios autoprodutores con excedentes de energía no convencionales son las estrategias del primer eje, aprovechamiento sostenible de los recursos renovables, del Plan Nacional de Energía 2017-2032 del Ministerio de Energía y Minas (2017), que afectan directamente a la matriz energética que Guatemala está planteando a futuro,

Con el objetivo según el Ministerio de Energía y Minas (2017) “de cumplir con el artículo 18 de la Ley Marco de Cambio Climático, definiendo la orientación del sector energía para ser competitivo y eficiente en el uso y aprovechamiento

de los recursos naturales que permitan la reducción de emisiones” (p. 60) de Gases de efecto invernadero (GEI) “con un enfoque de sostenibilidad en el uso y aprovechamiento de la energía” (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 60).

Las acciones de todos los ejes planteados en el Plan Nacional de Energía buscan dar cumplimiento al objetivo de un desarrollo sostenible para todos los sectores nacionales, respecto al primer eje, es posible entender sus acciones de acuerdo con su objetivo:

Este tiene como objeto priorizar el aprovechamiento de los recursos naturales renovables, para la generación y consumo de energía eléctrica. Los recursos renovables deben ser aprovechados de manera sostenible en el tiempo para no comprometer los recursos de las generaciones futuras, logrando beneficios ambientales y climáticos a través de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 65)

Buscando el cumplimiento del objetivo anteriormente planteado, el plan promueve las acciones necesarias para expandir la capacidad de generación de energía eléctrica, como lo indica el plan, “a partir de fuentes renovables y su energía base por medio de combustibles fósiles que garanticen la seguridad energética del país” (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 66).

Siguiendo los lineamientos anteriormente citados, para la Diversificación de la Matriz Energética, “la nueva potencia instalada de generación eléctrica que se incorporará al parque de generación, proveniente de 6,102.28 MW de las plantas candidatas; deberán generar un estimado de 16,153 GWh de energía para el año 2032” (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 66).

La distribución de la potencia proyectada a agregarse al parque de generación actual queda:

Tabla II. **Proyección de plantas por agregarse, según el recurso aprovechable, al parque de generación guatemalteco**

Recurso	Cantidad	MW
Agua	66	3,550.28
Geotermia	3	300
Sol	8	187
Híbridos	4	316
Eólico	3	101
Bunker	4	445
Carbón	2	600
Gas Natural (IMP)	4	603
<b>TOTAL</b>	<b>94</b>	<b>6,102.28</b>

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2017). *Plan nacional de energía 2017-2032*.

Estos son los datos necesarios para tomar en cuenta en el sector energía, para el desarrollo de la investigación.

### 7.3. Transporte público

El transporte público es el medio colectivo o privado disponible para que la sociedad pueda transportarse de un lugar a otro, este puede ser terrestre, aéreo y marítimo, para White, (2017), en su definición de transporte público



incluye a todos los modos de transporte disponibles para el público, independientemente de la propiedad de este, y agrega los servicios programados de buses, autocares, operadores aéreos y ferroviarios nacionales, incluyó taxis, autobuses y autocares privados para contratos, mercado de transporte de turismo y excursiones atendido por la industria de autocares y también incluye la prestación de servicios escolares mediante autobuses y autocares rentados.

### **7.3.1. Capacidad**

Para determinar o medir la capacidad del transporte público de acuerdo con la necesidad de la población, es importante la medición de algunos indicadores. Dentro del alcance del transporte público, está la medición del uso del transporte y este puede ser medido por el número de viajes reportados por los operadores, otra forma puede ser la distancia del viaje, el gasto de los usuarios del transporte público también puede ser un indicador, así como el ingreso de los operadores del transporte.

En el caso de los datos anuales derivados del operador, se puede estimar una tasa de viaje anual dividiendo el total de viajes reportados por una estimación de la población de captación servida, otra forma para la medición es tomar en cuenta la cantidad de personas en una población que cuenta con automóvil propio, y tomando en cuenta las otras formas de transporte propio para los viajes cortos, como bicicletas, motocicletas u otro medio compacto empleado para rutas cortas como alternativa, todo esto de acuerdo a (White, 2017).

La tarea de un administrador de tráfico o planificador de transporte es lograr el equilibrio óptimo entre los viajes de puerta a puerta deseados por los usuarios individuales y las características del transporte, especialmente la velocidad, la capacidad y el costo de los modos disponibles. Los diferentes

modos de transporte sirven a diferentes densidades de tráfico, lo que a su vez afecta la estructura de la red de transporte. La carga promedio mínima para que un servicio de autobús convencional sea viable, promediada durante todo el día en ambas direcciones, es de diez a doce pasajeros (si todos los costos, incluida la depreciación de reemplazo, deben cubrirse: esto también afectará el nivel de la tarifa).

Para una nueva ruta normalmente se necesitarían varios miles de pasajeros por hora, aunque muchas rutas con densidades mucho más bajas continúan justificándose por el hecho de que ya se han realizado inversiones en infraestructura (o las alineaciones existentes pueden reutilizarse a bajo costo), según (White, 2017).

### **7.3.2. Diversificación**

El transporte público se ha ido diversificando en cuanto a su fuente de energía que necesitan para operar, esto es más notable en los países de alto desarrollo en el mundo, pero en los últimos años en América Latina ya existen proyectos para diversificar el transporte público terrestre, en general, los tipos de transporte público terrestre, según su fuente de energía, pueden ser de combustible y eléctricos.

Los tipos de transporte público eléctricos terrestre pueden ser, buses eléctricos, buses eléctricos para transporte urbano y carretera, trenes eléctricos transporte ferroviario para largas distancias.

Respecto a las acciones del Plan Nacional de Energía 2017-2032 del Ministerio de Energía y Minas, (2017) en su segundo eje, eficiencia y ahorro

energético, y su acción 6 (sector transporte), plantea algunos mecanismos para el cumplimiento en la reducción de GEI, los aplicables al transporte público son:

El primero de ellos muy interesante y ambicioso, este indica: “Expandir la infraestructura mediante la construcción de vías férreas para trenes eléctricos o teleféricos” (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 88). Justamente este mecanismo impulsa la diversificación del transporte, y es una herramienta para el estudio de investigación que se está planteando.

El segundo de ellos pretende una mejora del sistema de transporte actual, específicamente indicando “Mejorar la infraestructura y equipamiento para el transporte público, que consiste en modernizar el parque de buses urbanos. Esto mejora la eficiencia del sistema de transporte público” (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 88).

El tercer punto también es muy interesante y emocionante, ya que se centra más en la logística del control del transporte público, este indica, “Mejorar el nivel de servicio de transporte público aumentando la rapidez del servicio para un mejor aprovechamiento de la quema de combustibles” (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 88).

Para el cuarto punto, “Mejoramiento de la infraestructura vial del país, por medio de ampliación de carreteras, mantenimiento constante de las carreteras y libramiento de vías a través de tramos alternos” (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 88).

## **7.4. Trenes eléctricos**

La diversificación del transporte público permite proponer diferentes tipos de soluciones de diferentes tecnologías, y se debe tomar en cuenta la recurrencia, necesidad del transporte y las distancias de la ruta que se desea cubrir. Para rutas largas y cortas existen diferentes tipos de soluciones, los trenes eléctricos aplican perfectamente para rutas dentro de la zona urbana y rutas largas, extraurbanas.

### **7.4.1. Tipos de trenes**

Existe una gran solución de trenes eléctricos para el transporte público, pero vale la pena centrarse en las soluciones de última tecnología por su eficiencia de proceso y la necesidad de la toma de datos para medir la eficiencia y viabilidad en su operación.

Entre los tipos de trenes se puede encontrar los *subway* o metro (tren subterráneo), *subway* o metro (tren subterráneo), en pocas palabras, es un tren y el túnel por el que pasa el tren. Un tren subterráneo consta de varios vagones conectados que contienen asientos duraderos, así como postes y correas para que la gente se agarre cuando el tren está lleno.

Los trenes, conocidos como material rodante, son complejos dado que incluyen un sistema de tracción y dinámica que impacta mucho en el consumo de energía. Por ejemplo, el sistema de tracción determina cómo la propulsión se genera y proporciona fuerza para hacer avanzar un tren; y el sistema dinámico determina cómo se acelera o desacelera un tren, lo que afecta el comportamiento transitorio del tren que impacta en gran medida el consumo instantáneo de

energía. Además, el sistema de frenos determina si la potencia de frenado se regenera para usarse o se desperdicia en forma de calor.

Para el frenado regenerativo, la energía de frenado se puede recuperar convirtiendo la energía cinética en una forma que pueda utilizarse inmediatamente o almacenarse hasta que se necesite; sin embargo, otros sistemas de frenos, como el frenado dinámico, disipan la energía eléctrica en forma de calor en lugar de usarla. Otras características del tren, como el peso del vagón vacío, el número de ejes por vagón y el coeficiente de arrastre afectan significativamente las fuerzas que actúan sobre un tren y, por lo tanto, también son parámetros importantes en el modelado energético, como lo plantea (Wang y Rakha, 2017).

La tecnología de estos tipos de trenes no solo pueden ser subterráneos, existen ciudades en las que se puede apreciar que estos trenes también estén en la superficie, estos pueden ser aprovechados para grandes ciudades.

También existe otro tipo de trenes conocidos como los tranvía, en algunos casos conocidos como tren de cercanías, por las rutas cortas que manejan para distribuir a los usuarios en los puntos más céntricos, generalmente este tipo de trenes son de CA en circuitos trifásicos, y el orden de alimentación es en kV, según disponibilidad, siempre es preferible que esté a niveles de tensión según la red de distribución de la ciudad, para ahorrar en infraestructura eléctrica, según (Pinzón y Herrera, 2009).

Otro tipo de tecnología propuesta para cubrir rutas de largas distancias es el tren de alta velocidad, se tiene como referencia los de China que representan más del 60 % del mundo.

Hoy en día, la operación de los trenes de alta velocidad depende principalmente de la experiencia personal de los conductores, lo que genera una gran diferencia de consumo de energía y perfiles de velocidad para diferentes conductores, especialmente el ferrocarril con pendientes pronunciadas y límites de velocidad bajos en la región occidental de China, este tipo de trenes de alta velocidad cuentan con un sistema de frenado integrado electroneumático, lo que marca la diferencia en cuanto a parámetros propios del tren, como indican (Xiao, Chen, Chai, Liu, y Wang, 2018).

Según Zhang, Jia, Wang, y Xu, (2019), a pesar de los diferentes tipos que se tiene de trenes, se toma siempre los parámetros básicos de un sistema eléctrico, y se suman a ellos los sistemas de automatismo propios del tren, según su eficiencia de fabricación, y otras tecnologías como la regeneración de frenado para hacer eficiente los consumos de energía, algunas consideraciones que toman estos autores a la hora de estudiar los consumos de trenes, en donde plantea un modelo de programación de dos niveles.

El nivel inferior ajusta la hora de llegada y salida de cada tren para ahorrar energía. El nivel superior está construido para mantener las restricciones de seguridad entre los trenes y la estabilidad del horario, cuya salida es la entrada del nivel inferior. Los supuestos y notaciones para facilitar la formulación del problema son:

El primero es que, en el modelo de dos niveles, las estaciones con líneas laterales se abstraen como nodos, y las secciones de bloque entre las señales ferroviarias se representan mediante arcos que se utilizan para conectar esos nodos. El segundo es que el tren se modela como un punto de masa, que se ha utilizado con éxito en el campo del control óptimo de trenes. Y el tercer punto es que los trenes circulan por líneas ferroviarias rectas ideales, y no se consideran

las pendientes, curvas y túneles, como los modelos plantados por (Zhang *et al.*, 2019).

Entonces a pesar de los diferentes tipos de trenes, los parámetros a considerar siempre son los mismos, y en ese caso se debe considerar un tipo de tren estándar, para fines prácticos en el estudio de consumos de energía de un sistema de trenes eléctricos.

#### **7.4.2. Consumos de energía**

En general los consumos de energía eléctrica para los trenes eléctricos dependen de los parámetros propios del tren y las instalaciones de su sistema eléctrico, sin embargo, un factor importante es el tipo de tecnología adaptada para mejorar la eficiencia de los consumos de energía.

Componentes del sistema de metro para modelado energético, además del tren en sí, hay varios otros componentes del sistema ferroviario, como la infraestructura de la vía y la carga de pasajeros, que afectan las fuerzas de tracción / frenado que actúan sobre el tren. Por ejemplo, una pista en buen estado (buenos rieles y traviesas) reduce el esfuerzo de tracción inicial; mientras que una pista con pendientes pronunciadas y gran curvatura genera fuerzas de alta resistencia; y la carga de pasajeros afecta el peso total del vagón y, por lo tanto, las fuerzas que actúan. Estos factores también deberían incorporarse en el marco de la modelización energética, como indican (Wang y Rakha, 2017).

Las medidas más ampliamente disponibles para el consumo de energía por ferrocarril (ya sea eléctrico o diésel-eléctrico) son las estimadas sobre una base promedio bruta anual.

Específicamente, las ecuaciones de debajo de la 5 a la 7 presentan el enfoque de modelado, donde  $E_p$ ,  $E_s$  y  $E_v$  son la energía consumida por pasajero kilómetro ( $\text{kW h} / \text{P} \cdot \text{km}$ ), por asiento kilómetro ( $\text{kW h} / \text{S} \cdot \text{km}$ ) y por vehículo kilómetro ( $\text{kW h} / \text{V} \cdot \text{km}$ ), respectivamente;  $E$  es el consumo de energía anual de un sistema de transporte ferroviario en  $\text{kW h}$ ;  $M_p$ ,  $M_s$  y  $M_v$  son el total de kilómetros por pasajero, kilómetros por asiento y kilómetros por vehículo, respectivamente;  $C$  es la capacidad de asientos del tren y  $\beta$  es el factor de pérdida de línea asociado con el sistema de transmisión del tren.

Los parámetros de los modelos están disponibles en la base de datos de tránsito nacional (NTD) páginas 13 a15, datos en los que se basaron (Wang y Rakha, 2017).

$$E_p = \frac{E}{M_p \times \beta} \quad (5)$$

$$E_s = \frac{E}{M_s \times C \times \beta} \quad (6)$$

$$E_v = \frac{E}{M_v \times \beta} \quad (7)$$

A pesar de la adquisición sin esfuerzo de las mediciones agregadas, no son capaces de representar las diferencias en el consumo de energía asociadas con las características de la ruta y el vehículo, la carga de pasajeros, los perfiles de velocidad y las condiciones climáticas y de la pista, y por lo tanto, no son adecuadas. Por lo tanto, los esfuerzos de investigación se han centrado en desarrollar un marco de modelado sensible a las características del sistema antes mencionadas.



Según Wang y Rakha, (2017), El marco de modelado propuesto caracteriza la predicción de energía como dos funciones por partes, como se demuestra en la ecuación (8) (consumo de energía) y la ecuación (9) (regeneración de energía). Básicamente, la energía se calcula segundo a segundo. Cuando el tren está en modo de tracción, la energía fluye desde el sistema de energía eléctrica a las ruedas con la potencia en las ruedas siendo positiva ( $P > 0$ ).

Alternativamente, cuando el tren está en modo de frenado regenerativo, la energía fluye desde las ruedas de regreso al sistema de potencia y la potencia en las ruedas es negativa ( $P < 0$ ). Aquí es digno de mención que, para calcular la energía regenerada ( $EC_{re}$ ), solo se considera la potencia negativa.

$(\alpha_{01} \times \beta_1 + \alpha_{02} \times \beta_2)$  en la ecuación (8) se refiere a la potencia de cabecera (HEP, head-end power) en la que  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son variables ficticias iguales a 0 o 1.  $\alpha_{01}$ , en la mayoría de los casos, se aplica a HEP ( $\beta_1 = 1$  y  $\beta_2 = 0$ ) excepto cuando un tren está a punto de comenzar a moverse y espera en la estación de ruta inicial donde solo se aplica una pequeña fracción de HEP ( $\alpha_{02}$ ) ( $\beta_1 = 0$  y  $\beta_2 = 1$ ).

Esto explica el hecho de que los trenes solo mantienen el sistema de ventilación y las luces encendidas mientras esperan para cargar pasajeros antes de que comience un viaje y, por lo tanto, solo consumen una pequeña fracción de HEP, como lo plantean (Wang y Rakha, 2017).

$$EC(t) = \begin{cases} \alpha_{01} \times \beta_1 + \alpha_{02} \times \beta_2 + P(t), & \forall P(t) > 0 \\ \alpha_{01} \times \beta_1 + \alpha_{02} \times \beta_2, & \forall P(t) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$EC_{re}(t) = \begin{cases} P(t) \times \eta_{rb}(t), & \forall P(t) < 0 \\ 0, & \forall P(t) \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

La tasa de consumo de energía promedio para un viaje completo se estima sumando las predicciones de energía instantánea y luego dividiendo por la duración del viaje, como se ilustra en la Ec. (10), siendo  $d$  la longitud del viaje (km), según lo plantean (Wang y Rakha, 2017).

$$EC_d[kWh / V \cdot km] = \frac{\sum_t [EC(t) + EC_{re}(t)]}{d} \quad (10)$$

Estas son las ecuaciones que se podrían considerar para fines prácticos, en el estudio de consumos de energía contra la matriz energética planteada en El Plan de Energía 217-2032 del Ministerio de Energía y Minas. En todo caso para mayor acercamiento, debería de solicitarse los datos de consumo y las condiciones de operación al fabricante del tren.

## **8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS**

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### **1. MARCO REFERENCIAL**

1.1 Estudios previos (recientes)

1.2 Antecedentes

### **2. MARCO TEÓRICO**

2.1. Descarbonización en el mundo

2.1.1. Compromisos

2.1.2. Sector energía

2.1.3. Sector transporte

2.2. Matriz energética

2.2.1. Definición

2.2.2. Cálculo

2.2.3. Planeación a futuro

2.3. Transporte público

2.3.1. Capacidad

2.3.2. Diversificación

- 2.4. Trenes eléctricos
  - 2.4.1. Tipos de trenes eléctricos
  - 2.4.2. Consumos de energía
  
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
  - 3.1. Características del estudio
    - 3.1.1. Diseño
    - 3.1.2. Enfoque
    - 3.1.3. Alcance
    - 3.1.4. Unidad de análisis
  - 3.2. Variables
  - 3.3. Fases del desarrollo de la investigación
    - 3.3.1. Recolección y organización de información
    - 3.3.2. Análisis de la capacidad de la matriz energética
    - 3.3.3. Implementación de ensayos de transporte para la reducción de emisiones de dióxido de carbono
    - 3.3.4. Capacidad de la matriz energética para cumplir con compromisos de descarbonización de Guatemala
    - 3.3.5. Resultados esperados
  - 3.4. Técnicas de análisis de información
  
- 4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
  - 4.1. Escenarios analizados
  - 4.2. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1 Características del estudio**

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo, ya que las variables más generales a tratar en la investigación son las emisiones de dióxido de carbono por parte del transporte público y la capacidad de la matriz energética son variables que pueden deducir, con el apoyo de la teoría de circuitos eléctricos, los consumos de energía por otros tipos de transporte, como los trenes eléctricos.

El alcance es descriptivo, dado que la investigación trata de mostrar los desafíos con los que se encontrará la matriz energética, ante el crecimiento del transporte público del tipo eléctrico, en donde es posible tomar las definiciones teóricas de los parámetros eléctricos para determinar los consumos de energía, y al mismo tiempo calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> que generan este tipo de tecnologías, sea directa o indirectamente para el caso de la tecnología con la que se esté generando la energía para cubrir esta demanda. Todas las variables por emplear para este cálculo están relacionadas e implican causalidad unas con otras.

El diseño adoptado para el trabajo de investigación será no experimental, dado que los datos obtenidos de la matriz energética son datos no manipulables por ser la suma de todas las capacidades físicas de cada central, para generar energía demandada por la red de Guatemala, y por otro lado, los datos de la matriz energética planteados a futuro son expuestos por el Ministerio de Energía y Minas no manipulables, con estos datos se buscará comprobar si estos datos

serán capaces de adoptar escenarios de altas cargas eléctricas como los trenes eléctricos, sin comprometer la demanda de otros sectores de consumo en el país.

También se plantea que el estudio tendrá una clasificación de periodo transaccional dado que se explorarán los datos de la matriz energética en tres momentos puntuales, 2016, año en el que se emitió el plan nacional de energía, año 2021, como escenario actual y año 2032, año en el que la matriz energética se ha proyectado 2032 en el plan de energía guatemalteco.

Los datos por recolectar se compararán ante los escenarios de altas cargas de consumo de energía como los trenes eléctricos, buscando los efectos de causalidad en la matriz energética.

## **9.2 Unidades de análisis**

El centro de estudio será la matriz energética de Guatemala, que está conformada por todos los centros de generación disponibles en Guatemala, incluyendo las tecnologías renovables y no renovables.

Los tipos de generación de fuente renovable que conforman la matriz energética son las tecnologías de biogás, biomasa, geotérmica, hidroeléctrica, solar y eólica. Mientras que los tipos de generación de fuente no renovable son los centros de generación de carbón, bunker, diésel y cualquier combustible fósil.

Los escenarios a los que se expondrá la matriz energética serán definidos por las cargas eléctricas de alto consumos de energía, las cargas eléctricas serán los trenes eléctricos.

### 9.3 Variables

Las variables del estudio se describen a continuación:

Tabla III. **Variabes del estudio de investigación**

Criterio Variable	Cualitativa (Categoría)		Cuantitativa (Numérica)		Manipulable	Observable	Nivel de medición
	Numérica	Policotómica	Discreta	Continua			
Emisiones de CO <sub>2</sub>				X		X	Razón
Rutas de Transporte		X				X	Nominal
Cantidad de Transporte Público			X			X	Razón
Usuarios de Transporte Público			X			X	Razón
Tipos de Transporte Público		X				X	Nominal
Impedancia eléctrica de Sistema de Trenes				X		X	Razón
Nivel de tensión de operación de Sistema de Trenes				X		X	Razón
Demanda de Potencia de Transporte Público				X		X	Razón
Potencia de la Matriz Energética				X		X	Razón
Tecnologías de la Matriz Energética		X				X	Nominal
Eficiencia				X		X	Razón

Fuente: elaboración propia.

### 9.4 Fases del estudio

A continuación, se plantean las fases de investigación para este estudio, tomando en cuenta la observación, análisis y acciones para demostrar la correlación o causalidad entre la unidad de análisis y las variables externas.

#### **9.4.1 Fase 1: recolección y organización de información**

Se recopilará fuentes bibliográficas actualizadas para conocer los consumos de energía de los trenes eléctricos, de acuerdo con los tipos de trenes y sobre todo los que se han enfocado en ser más eficientes, implementando el frenado regenerativo.

Este trabajo de investigación requiere una recolección de datos por parte de las diferentes entidades involucradas en el sector energía y transporte, para el caso de los datos necesarios de la matriz energética se tomarán de las publicaciones de las revistas publicadas por el Ministerio de energía y minas, tomando como guía el Plan Nacional de Energía 2017-2032 y cualquier variación o una actualización del mismo Plan Nacional.

También se explorará las emisiones de dióxido de carbono al ambiente, por parte del transporte público en Guatemala. Esto servirá para evaluar las reducciones de CO<sub>2</sub> en los escenarios de diversificación del transporte público. Estos datos se recolectarán de las publicaciones del Balance Energético de Guatemala por parte del Ministerio de Energía y Minas y de la Dirección General de Transportes.

Los datos de las cantidades de usuarios y del transporte para la ruta de Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala, serán recolectados de la Dirección General de Transportes. Estos datos serán útiles para crear escenarios reales en la cantidad de trenes eléctricos para este sistema de transporte.

Una vez se hayan recopilado los datos y se haya explorado la información teórica para abordar el estudio de investigación, se procederá a categorizar los



datos según las variables a utilizar, de tal manera que queden organizados para ser interpretados para el estudio.

La información de la matriz energética será ordenada de acuerdo con sus variables de capacidad de generación de energía, y clasificadas de acuerdo con la tecnología de fuente renovable y no renovable. Y se clasificarán los datos de las capacidades totales de la matriz energética por los tres periodos expuestos en el diseño de investigación (2016, 2021 y 2032).

Para la información teórica de los trenes eléctricos, se buscará seleccionar el tipo de tren más eficiente en cuanto a consumos de energía, se tomará en cuenta las ecuaciones 8, 9 y 10 abordadas en el marco teórico, como base, para el cálculo de los consumos de energía, variando la cantidad de trenes para el transporte público.

Los datos de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte convencional, serán ordenados y recolectados, únicamente, para la ruta de Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala.

#### **9.4.2 Fase 2: análisis de la capacidad de la matriz energética**

Con los datos recopilados de la fase anteriores, se expone a continuación, de manera general, como se pretende abordar esta fase de la investigación. En primer lugar, se debe tener definido lo siguiente:

- Matriz energética 2032 de Guatemala, planteada por el Ministerio de Energía y Minas, en el Plan Nacional de Energía.

- La Ruta de transporte público será: Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala y viceversa.
- Un Sistema de transporte público de trenes eléctricos.

Con estas condiciones iniciales, se expone cómo se determinará la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público de la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, que puede soportar la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM.

- Paso1: una vez determinado el tipo de tren a implementar para el sistema de transporte público, se procederá a calcular los niveles de consumos de energía. Un ejemplo base para el cálculo de consumos son las ecuaciones 8, 9 y 10 que se han expuesto en la sección del marco teórico.

Sin embargo, para esta investigación se debe tomar en cuenta que un sistema de transporte público de trenes eléctricos tendrá un consumo base que depende de los centros de control y monitoreo y las estaciones de abordaje y salida, a todos estos en conjunto se le denominará *Sistema base de consumo*, y por otro lado existirá una variable que es la cantidad de trenes, y para fines de análisis, se desprejará cualquier nivel consumo en el que esta cantidad pueda afectar al Sistema base de consumo.

Y de forma muy general se expone el Nivel de Consumos para el sistema de trenes para la ruta base de este estudio, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \text{Consumo de energía del sistema de trenes eléctricos} \\
 & = \text{Cantidad de trenes eléctricos} \\
 & + \text{Sistema base de consumo}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

- Paso 2: se tomarán como base, la ecuación número 1 y los datos de la 4 de la sección del marco teórico, para determinar capacidad de la matriz energética para el año 2032.
- Paso 3: se evaluará las cargas el nivel de carga supuesto al 2032, según estimaciones realizadas por el MEM para la realización de este Plan de Energía y Planes de expansión de generación, a esta variable se le denominará *Consumos de otros sectores*.
- Paso 4: por último, se procederá a comparar la capacidad y consumos proyectados para el Plan de Energía 2017-2032, contra el Consumo de energía del sistema de trenes eléctricos, de forma muy general, como se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 & (\text{Capacidad de Matriz Energética} \\
 & \quad > \\
 & - \text{Consumo de otros sectores}) = \text{Consumo de energía del sistema de trenes eléc} \\
 & \quad <
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Con la ecuación 11 y la ecuación 12, se podrá determinar la cantidad de trenes eléctricos que es capaz de soportar la matriz energética sin comprometer la demanda de otros sectores de consumo. El procedimiento será disminuir la cantidad de trenes en la ecuación 11, hasta que los resultados de la ecuación 12 muestre que existe una igualdad o la parte izquierda es mayor a la derecha.

### **9.4.3 Fase 3: implementación de ensayos de transporte para la reducción de emisiones de dióxido de carbono**

Con los datos recopilados de la fase 1, relacionados con las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte público en Guatemala, se pretende determinar la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público de la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, para que Guatemala pueda cumplir con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada.

Para lograr este objetivo, es necesario tener identificados los siguientes puntos:

- Cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> por parte del transporte público, en 2016, los datos más recientes a la fecha actual, y el cálculo de tendencias a 2032.
- Compromiso de Guatemala en su Contribución Nacional Determinada, expuesto en Cantidad de reducciones de CO<sub>2</sub>.
- Cantidad de buses en la ruta de Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala en 2016, los datos más recientes a la fecha actual, y el cálculo de tendencias a 2032.
- Necesidad de transporte, expuesto en cantidad de usuarios promedio de buses en la ruta de Antigua Guatemala a la ciudad capital.

Una vez se tengan identificados los datos expuestos anteriormente, se puede proceder con las comparaciones necesarias, y los pasos serán los siguientes:

- Paso 1: se debe identificar de acuerdo con la cantidad de buses y de forma anual, o como se encuentre disponible la información, qué porcentaje de las emisiones de CO2 total que produce el transporte público en Guatemala, pertenecen a la Ruta de Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala.

De forma general se denominan algunas variables y el proceso de reducción del escenario para aplicar el ensayo de estudio. A las emisiones de CO2 por parte del transporte público de Guatemala, en 2016, se denominará como “Transporte16 CO2”, las de los datos más recientes a la fecha actual “Transporte21 CO2”, y las del cálculo de tendencias a 2032, como “Transporte32 CO2”.

Los porcentajes de emisiones de CO2 de los que es responsable la ruta de ensayo, darán lugar a las variables del estudio, Transporte16 AG CO2 para 2016, donde AG abrevia que es la ruta de Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala, Transporte21 AG CO2 para 2021, y Transporte32 AG CO2 para 2032. Reduciendo los datos a la muestra deseada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Transporte16 AG CO2} &= \% \quad \text{Transporte16 CO2} \\
 \text{Transporte21 AG CO2} &= \% \quad \text{Transporte21 CO2} \\
 \text{Transporte32 AG CO2} &= \% \quad \text{Transporte32 CO2}
 \end{aligned}
 \tag{ 13}$$

- Paso 2: se denominará a la cantidad de reducciones de CO2 al que se ha comprometido Guatemala en su NDC como “Guatemala CO2”.
- Paso 3: se identificará el porcentaje de transporte público en cantidad que pertenecen a la ruta de Antigua Guatemala, para los años 2016, 2021 y 2032 y se denominarán “Transporte16 AG”, “Transporte21 AG” y “Transporte32 AG”, respectivamente para cada año.

- Paso 4: se hará una reducción del transporte público convencional, diversificando el transporte de la ruta de ensayo, con el sistema de trenes eléctricos, seleccionado en la fase anterior. Esta reducción se logrará identificando la cantidad de trenes que se necesitan para cubrir la demanda de los usuarios en esta ruta.
- Paso 5: una vez identificado la cantidad e implementado la diversificación del transporte público en la ruta de ensayo, procederá a compararse el nivel de emisiones de CO2 por esta ruta de transporte y el compromiso de Guatemala en su NDC, de la siguiente manera:

$$\text{Red Transporte 16 AG CO2} = \text{Transporte16 AG CO2} \frac{\text{Transporte16 AG} - \text{Cantidad de trenes eléctricos}}{\text{Transporte16 AG}} \quad (14)$$

Y así ara los años 2021 y 2032, para luego comparar como sigue:

$$\begin{aligned} &> \text{Red Transporte16 AG CO2} \\ \text{Guatemala CO2} &= \text{Red Transporte21 AG CO2} \\ &< \text{Red Transporte32 AG CO2} \end{aligned} \quad (15)$$

Con la ecuación 14 y la ecuación 15, se podrá determinar la cantidad de trenes eléctricos que son necesarios implementar, para reducir las emisiones de CO2 en Guatemala, al número al que se ha comprometido Guatemala en su NDC.

#### **9.4.4 Fase 4: capacidad de la matriz energética para cumplir con compromisos de descarbonización de Guatemala**

Las fases anteriores son la base para identificar las acciones que deben tomarse en cuenta, para que la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM, pueda soportar la cantidad de trenes que Guatemala necesita para cumplir con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada, buscando enfocarse, estratégicamente, en los subsectores transporte y de energía eléctrica.

Los pasos por seguir para el desarrollo de esta fase son:

- Paso 1: identificar la cantidad de trenes eléctricos que se necesitan para cumplir con la Propuesta Condicionada presentada en la NDC.
- Paso 2: calcular el nivel de consumo de energía de la cantidad de trenes del paso anterior
- Paso 3: comparar nuevamente con la ecuación 12 de la fase 2 de esta sección de metodología, la capacidad de la matriz energética con los niveles de consumo de energía que se determinen del paso 2.
- Paso 4: de acuerdo con los resultados de la comparación del paso 3, cuando se determine que la capacidad de la matriz energética sea menor, evaluar la necesidad de incrementar la capacidad de la matriz energética planteada al año 2032, o, por otro lado, si sus valores son iguales o levemente mayor, dar a conocerlos para que sea necesario considerarlos en un nuevo plan de expansión de generación.

Estas fueron las fases de desarrollo para el trabajo de investigación, de forma general.

#### **9.4.5 Resultados esperados**

Con el desarrollo de la fase 2, se busca reconocer, analizar y evaluar a la matriz energética planteada al año 2032, en cuanto a su capacidad de cobertura de demanda de energía de los sectores estimados en el mismo plan, adicionando a ella los consumos por parte de un sistema de trenes eléctricos en la ruta de ensayo.

La necesidad de este diagnóstico surge, por el problema de la persistencia de emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente desde el sector transporte, y las acciones y tendencias que actualmente se perciben en la sociedad, como estudios de factibilidad de proyectos de trenes eléctricos, proyectos de planes piloto de implementación de electromovilidad, tanto en el transporte particular, como en el transporte público, desde varios sectores.

Y si estos proyectos se implementan y la tendencia continua, vale la pena diagnosticar la planificación de la matriz energética planteada al año 2032 en escenarios similares.

Junto con este diagnóstico, también vale la pena identificar la optimización en la cantidad de implementación o diversificación del transporte público, que pueden aportar de manera significativa a la minimización de emisiones de CO<sub>2</sub>, y cumplir con el NDC, tomando acciones estratégicas en los diferentes sectores de emisiones de CO<sub>2</sub> que perciben en la actualidad, todo ello se espera obtener en la fase 3.



Y por último en la fase 4, se pretende proponer, en una etapa temprana, las acciones necesarias que se deben realizar para que la matriz energética proyectada a 2032, no solo cumpla con su labor de descarbonización, sino que también soporte los consumos futuros de los sectores de consumo que ya se han evaluado, y con los puntos de alta tendencia en su crecimiento como el sector transporte.

En resumen, se pretende obtener la capacidad de generación de la matriz energética y su aporte de descarbonización combinado con el sistema de transporte diversificado, con un análisis de resultados de los cálculos de cada uno de los ensayos de la cantidad de trenes eléctricos en el sistema de transporte y los diferentes escenarios y de la matriz energética.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Para la observación de los datos a recopilar en el desarrollo de este estudio, se requiere un ordenamiento de información en tablas y elaboración de gráficas, empleando herramientas como Excel. También se usarán tablas de información de consumos de energía, parámetros eléctricos, entre otros datos de los trenes eléctricos que sean publicados y brindados por los fabricantes en este mercado de transporte.

La validación de la información recopilada se hará con el apoyo de teorías y herramientas estadísticas como diagrama de barras o columnas, diagramas de dispersión, Histogramas, polígonos de frecuencias para la cantidad y necesidad de los usuarios del servicio de transporte de trenes eléctricos en la ruta de ensayo.

Para la evaluación de la información, se usarán funciones matemáticas, y según los tipos de variable se desarrollarán funciones discretas y continuas, acotadas en su propio dominio. Con las funciones matemáticas a desarrollar, se busca presentar la asociación o relación entre una variable y otra.

Para la validación de las funciones y verificación la capacidad de la matriz energética nacional para soportar cierta cantidad de trenes para el sistema de transporte público, y cantidad de trenes necesarios para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector transporte, se usarán ecuaciones y desigualdades discretas y continuas.

Las funciones y ecuaciones para plantear obedecerán a la teoría de circuitos eléctricos, la máxima transferencia de potencia en circuitos eléctricos y en la conversión de energía, en este caso es de la transferencia de potencia en forma de energía eléctrica a mecánica para el movimiento de los trenes. Una teoría más específica para trenes eléctricos es la del aprovechamiento y máxima eficiencia en el frenado regenerativo.

Con los resultados obtenidos de las ecuaciones y desigualdades se podrá proponer las acciones para fortalecer la matriz energética, tomando en cuenta un desarrollo sostenible para el país.

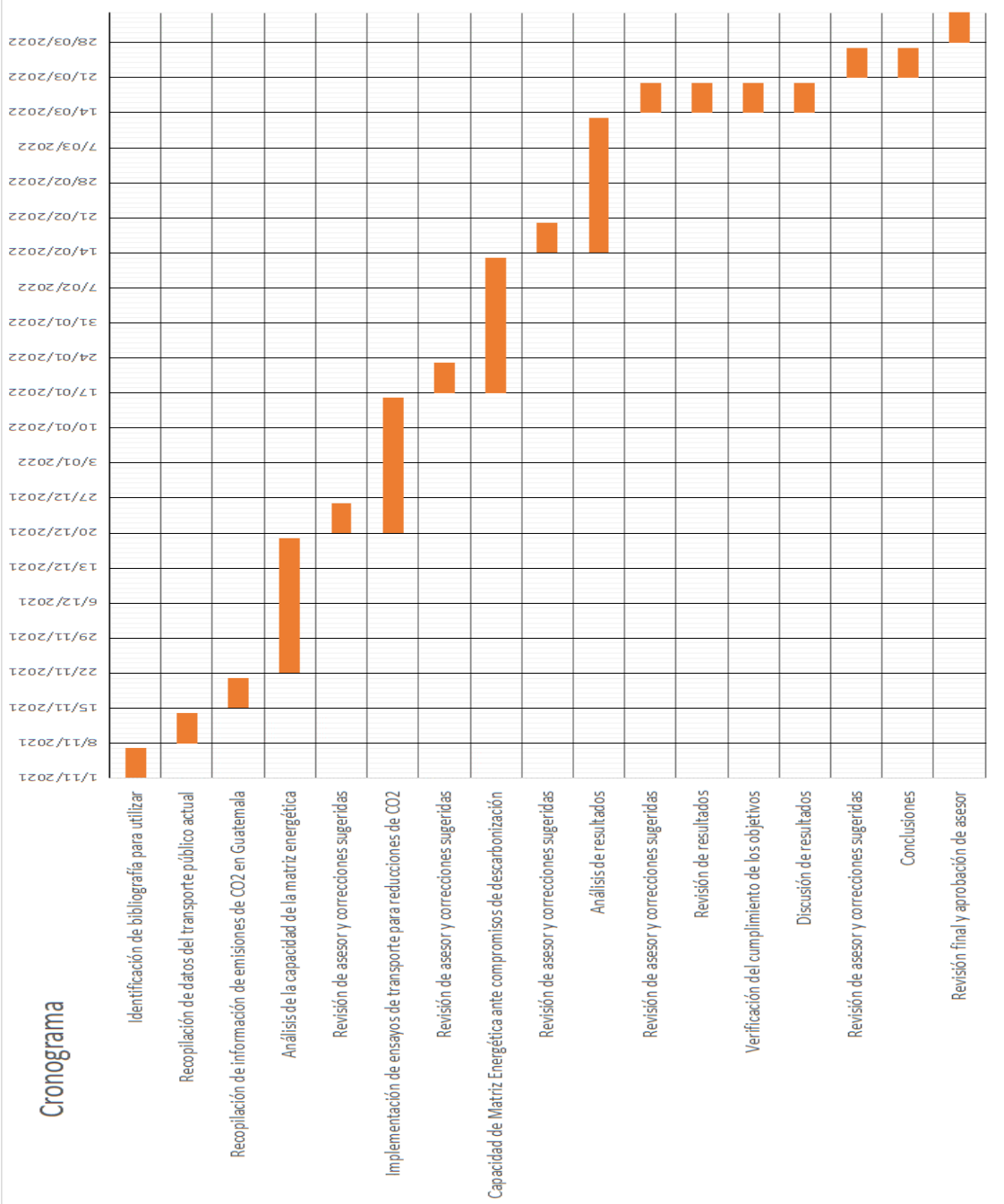
## 11. CRONOGRAMA

Tabla IV. **Actividades para la realización del trabajo de investigación**

No.	Actividad	Duración en días	Inicio	Fin
1	Identificación de bibliografía para utilizar	6	1/11/2021	7/11/2021
2	Recopilación de datos del transporte público actual	6	8/11/2021	14/11/2021
3	Recopilación de información de emisiones de CO2 en Guatemala	6	15/11/2021	21/11/2021
4	Análisis de la capacidad de la matriz energética	27	22/11/2021	19/12/2021
5	Revisión de asesor y correcciones sugeridas	6	20/12/2021	26/12/2021
6	Implementación de ensayos de transporte para reducciones de CO2	27	20/12/2021	16/01/2022
7	Revisión de asesor y correcciones sugeridas	6	17/01/2022	23/01/2022
8	Capacidad de Matriz Energética ante compromisos de descarbonización	27	17/01/2022	13/02/2022
9	Revisión de asesor y correcciones sugeridas	6	14/02/2022	20/02/2022
10	Análisis de resultados	27	14/02/2022	13/03/2022
11	Revisión de asesor y correcciones sugeridas	6	14/03/2022	20/03/2022
12	Revisión de resultados	6	14/03/2022	20/03/2022
13	Verificación del cumplimiento de los objetivos	6	14/03/2022	20/03/2022
14	Discusión de resultados	6	14/03/2022	20/03/2022
15	Revisión de asesor y correcciones sugeridas	6	21/03/2022	27/03/2022
16	Conclusiones	6	21/03/2022	27/03/2022
17	Revisión final y aprobación de asesor	6	28/03/2022	3/04/2022

Fuente: elaboración propia.

**Figura 4. Diagrama de Gantt de las actividades para la realización de la investigación**



Fuente: elaboración propia.

## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para el trabajo de investigación que se pretende abordar, del tipo descriptivo y no experimental, se ha detectado la necesidad de pocos recursos y herramientas que representan un costo directo, los costos serán asumidos por el estudiante de maestría. A continuación, se muestra la identificación de recursos con los que ya se cuenta y no representan un costo directo y los que sí representan un costo directo para el desarrollo de la investigación:

Tabla V. **Identificación de recursos y costos para la investigación**

Identificación de Recursos y herramientas	Costo directo	Costo indirecto
Recurso humano, Asesor y estudiante		Q 15,682.00
Computadora Personal		Q 5,000.00
Softwares de Oficina		Q 500.00
Servicios de Energía		Q 720.00
Servicios de Internet		Q 432.00
Servicios de teléfono		Q 240.00
Bibliografía	Q 300.00	
Revistas	Q 50.00	
Costos de Impresión	Q 200.00	
Costos de Imprenta	Q 2,000.00	
Gastos de viajes	Q 600.00	
Suma	Q 3,150.00	Q 22,574.00
<b>TOTAL</b>		<b>Q 25,724.00</b>

Fuente: elaboración propia.

El trabajo de graduación se pretende elaborar en 6 meses aproximadamente, y los costos directos diluidos mensualmente son de Q 525,

monto equivalente a la mitad de los pagos mensuales de la maestría. Entonces se determina que sí existe factibilidad para abordar el trabajo de investigación.



## REFERENCIAS

1. Breeze, P. (2019). *Power generation technologies*. Gran Bretaña: British Library Cataloguing-in-Publication Data.
2. Chicojay Coloma, C. A. (octubre, 2010,). Impacto en la matriz energética de Guatemala debido a la generación de energía eólica. *Repositorio USAC*, 53-62.
3. De Blas, I.; Mediavilla, M.; Capellán-Pérez, I., y Duce, C. (2020). *The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm*. Valladolid, España: GEEDS. doi:10.1016/j.esr.2020.100543
4. Dincer, I., y Zamfirescu, C. (2014). *Advanced power generation systems*. Ontario: University of Ontario Institute of Technology.
5. Glover, J. D. (agosto 1984). Train voltage analysis for ac railroad electrification. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 925-933.
6. Gobierno de Guatemala. (2014). *Contribucion prevista y determinada a nivel nacional*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN).
7. Goldemberg, J., y Tadeo P, L. (2010). *The “decarbonization” of the world’s energy matrix*. Sao Paulo, Brazil: Institute of Electrotechnics

and Energy, University of Sao Paulo.  
doi:10.1016/j.enpol.2010.03.040

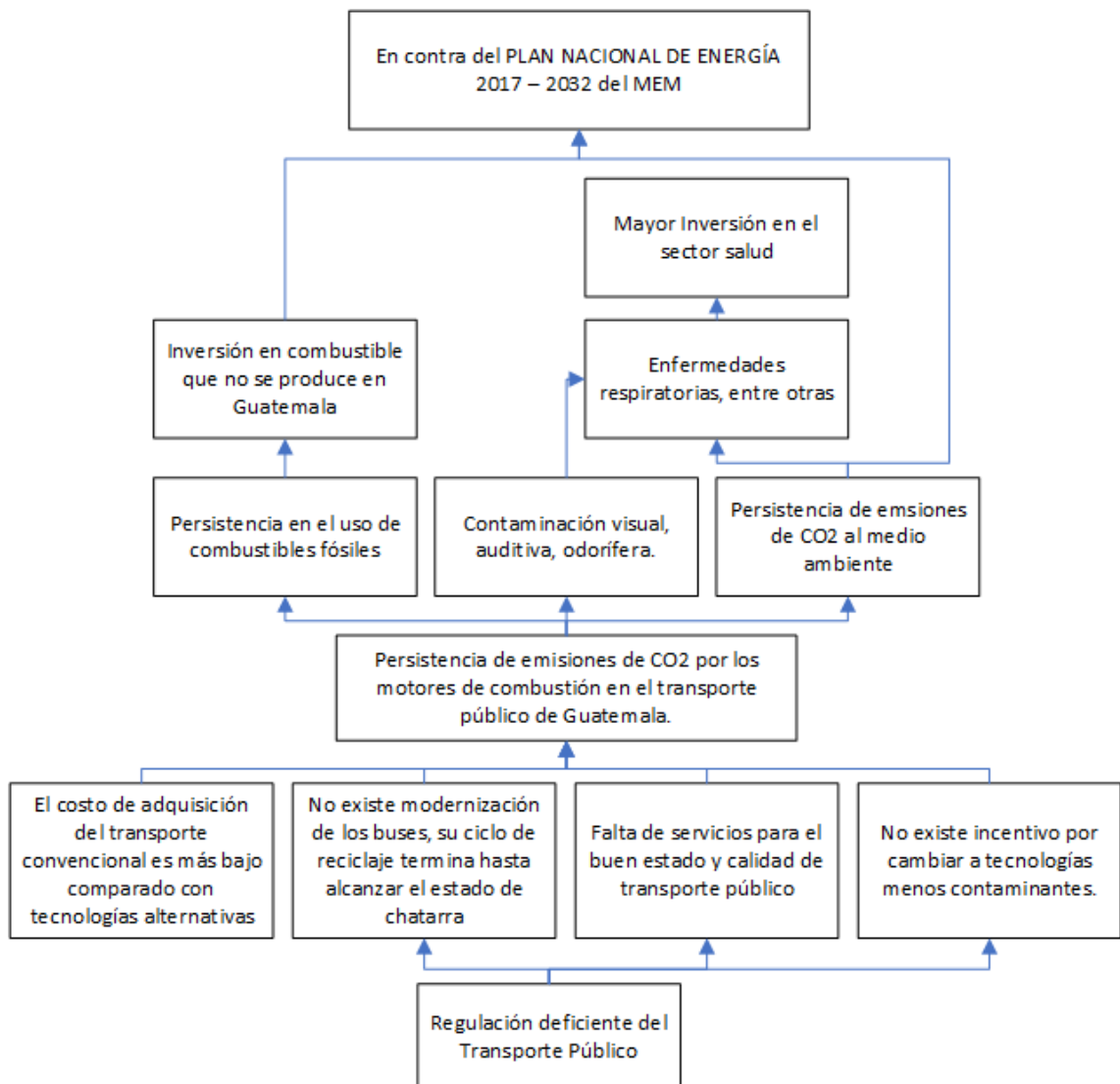
8. Lizarazu, R. (mayo 2013). Escenarios de emisión de gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> en el sector energético en Bolivia. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*, 6-7.
9. Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Plan nacional de energía 2017-2032*. Guatemala: Autor.
10. Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Política energética 2019-2050*. Guatemala: Autor.
11. Montzka, S., Dlugokencky, E., y Butler, J. (agosto 2011). Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases and. *National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, Colorado 80305, USA.*, 1-8.  
doi:10.1038/nature10322
12. Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. París: Naciones Unidas.  
Recuperado de [https://unfccc.int/sites/default/files/spanish\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf)
13. Naciones Unidas. (2021). *Climate Changes*. NDC. Recuperado de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/contribuciones-determinadas-a-nivel-nacional-ndc>
14. Pinzón, Herrera, I. (2009). Cálculo de demanda eléctrica de un sistema de tren de cercanías. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 1-6.

15. Rakha, H. A. (1 de febrero 2017). Electric train energy consumption modeling. *Journal of Applied Energy*, 1-11.
16. Rúa Gomez, C., Arango-Aramburo, S., y Larsen, E. R. (2017). Construction of a Chilean energy matrix portraying energy source substitution: A system dynamics approach. Colombia: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellin.
17. STANLEY R., B. (2001). Renewable energy today and tomorrow. *National Renewable Energy Laboratory, Golden,,* 1-11.
18. Sun, J. (octubre de 2003). The decrease of CO2 emission intensity is decarbonization at national and global levels. *Energy Policy*, 1-4.
19. Vandanjon, P., Bosquet, R., Coiret, A., y Gautier, M. (noviembre 2016). Model of high-speed train energy consumption. *Revista Université Bretagne-Loire*, 1-7.
20. Vasquez, L. (noviembre 2018). Energy system planning towards renewable power system: energy matrix change in cuba by 2030. *Revista Universitaria de Oriente de Santiago de Cuba, Cuba*, 1-6.
21. Wang, J., y Rakha, H. A. (febrero 2017). Electric train energy consumption modeling. *Center for Sustainable Mobility, Virginia Tech Transportation Institute*, 1-18.
22. White, P. (2017). *Public transport*. London and New York: Routledge. Recuperado de <https://books.google.com>

23. Xiao, Z.; Chen, M.; Chai, Y.; Liu, C. y Wang, Q. (julio 2018). Energy-efficient operation of high-speed trains based on a multiple phases model. *School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University*, 1-6.
  
24. Zhang, H.; Jia, L.; Wang, L, y Xu, X. (enero 2019). Energy consumption optimization of train operation for railway systems: algorithm development and real-world case study. *Revista School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University*, 1-14.

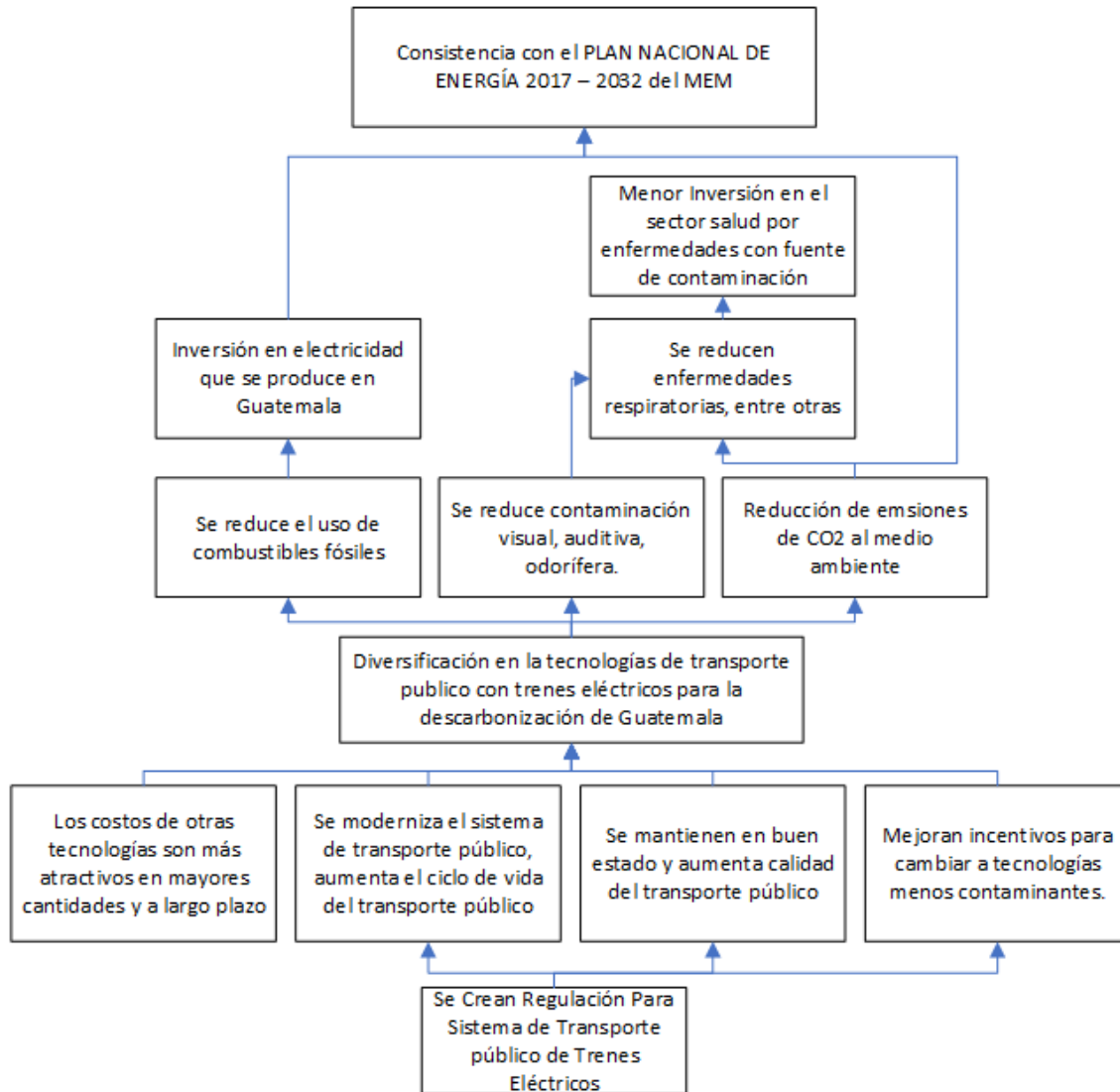
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Árbol de objetivos



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Matriz de coherencia

Título de Investigación	ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA		
Planteamiento del Problema de Investigación	Persistencia de emisiones de CO2 por los motores de combustión en el transporte público de Guatemala.		
Preguntas de Investigación	Objetivos	Metodología	
Principal	General	Recolección y Organización de Información	Resultados esperados
¿Cuál es capacidad de la matriz energética en los diferentes escenarios planteados en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM para soportar una diversificación de tecnología en el transporte público que involucra trenes eléctricos en la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala?	Evaluar la capacidad de los diferentes escenarios de la matriz energética al 2032, ante la demanda de cargas de trenes eléctricos en la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala que aportan al plan de descarbonización.	Recolección de datos por parte de las diferentes entidades involucradas en el sector energía y transporte, las revistas publicadas por el Ministerio de energía y minas.	Se pretende obtener la capacidad de generación de la matriz energética y su aporte de descarbonización combinado con el sistema de transporte diversificado, con un análisis de resultados de los cálculos de cada uno de los ensayos de la cantidad de trenes eléctricos en el sistema de transporte y los diferentes escenarios y de la matriz energética.
Específicos	Específicos	Fases	Fases
¿Qué cantidad de trenes eléctricos deben integrarse al transporte público en la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala para que pueda ser soportado por la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM?	Determinar la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público de la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, que puede soportar la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM.	Fase 2: Análisis de la capacidad de la matriz energética	Reconocer, analizar y evaluar a la matriz energética planteada al año 2032, en cuanto a su capacidad de cobertura de demanda de energía de los sectores estimados en el mismo plan, adicionando a ella los consumos por parte de un sistema de trenes eléctricos en la ruta de ensayo.

### Continuación apéndice 3.

<p>¿Qué cantidad de trenes eléctricos deben integrarse al transporte público en la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala para que Guatemala pueda cumplir, en el sector transporte, con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada?</p>	<p>Determinar la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público de la ruta de la ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, para que Guatemala pueda cumplir, en el sector transporte, con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada.</p>	<p>I. Fase 3: implementación de ensayos de transporte para la reducción de emisiones de dióxido de carbono</p>	<p>Identificación de la cantidad óptima de diversificación el transporte público, que pueden aportar de manera significativa a la minimización de emisiones de CO<sub>2</sub>, y cumplir con el NDC.</p>
<p>¿Qué acciones deben tomarse en cuenta para que la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM pueda soportar la cantidad de trenes que Guatemala necesita para cumplir con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada?</p>	<p>Identificar las acciones que deben tomarse en cuenta para que la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM pueda soportar la cantidad de trenes que Guatemala necesita para cumplir con la Propuesta Condicionada presentada en la Contribución Nacional Determinada.</p>	<p>Fase 4: capacidad de la matriz energética para cumplir con compromisos de descarbonización de Guatemala</p>	<p>Se pretende proponer, en una etapa temprana, las acciones necesarias que se deben realizar para que la matriz energética proyectada a 2032, no solo cumpla con su labor de descarbonización, sino que también soporte los futuros sectores de consumo que muestran una tendencia de crecimiento, tal como el sector transporte.</p>

Fuente: elaboración propia.