



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

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

Ing. Carlos Daniel Coguox González

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

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**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

ING. CARLOS DANIEL COGUOX GONZÁLEZ

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

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS
REGULADOS**

GUATEMALA, MAYO 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Roberto René Castellanos Moreira
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:

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 la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 15 de noviembre 2021.

Ing. Carlos Daniel Coguox González

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **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: **Ing. Carlos Daniel Coguox González**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, mayo de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, mayo de 2023

LNG.EEP.OI.498.2023

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

**“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 **Ing. Carlos Daniel Coguox González** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Dario Alvarez Cotí

Director

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





Guatemala, 7 de noviembre de 2022

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

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA** del estudiante **Carlos Daniel Coguox González** quien se identifica con número de carné **200614819** del programa de Maestría En Gestión De Mercados Electricos Regulados.

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

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



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

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

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

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: "**ESCENARIOS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL ANTE LA DIVERSIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO CON TRENES ELÉCTRICOS EN LA RUTA CIUDAD DE GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA**" del estudiante **Carlos Daniel Coguox González** del programa de **Maestría En Gestión De Mercados Eléctricos Regulados** identificado(a) con número de carné 200614819.

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

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

Mtro. Ing. Rony Aureliano Jucup Solís

Colegiado No. 16912

Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por darme tanta fortuna en la vida.

Mis padres

María González e Israel Coguox por su amor y apoyo incondicional.

Mis hermanos

Lilian, Miriam, Manuel e Israel Coguox González, por su apoyo y compañía durante mi vida.

Mi primo

Juan Cruz González, por su valioso apoyo incondicional.

Mi pareja

Nicole Böwer por su amor, paciencia y apoyo en mi carrera profesional.

Familia y amigos

Por cada experiencia dentro y fuera de la facultad.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser <i>alma mater</i> que permitió nutrirme de conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería	Por permitirme profesionalizarme y ampliar las oportunidades de desarrollar mi carrera.
Mis padres	Por su apoyo, paciencia y confianza en mí.
Mis amigos	Por haberme acompañado durante la carrera.
Mi pareja	Por mudarse de país para brindarme su apoyo incondicional en el desarrollo de mi carrera.
Mi asesor	M.A. Ing. Rony Aureliano Jucup Solís, por su guía y apoyo incondicional en mi investigación.
Mis colegas	Por haberme guiado en temas técnicos relacionados con teoría de trenes y estudios eléctricos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XVII
OBJETIVOS	XXI
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. MARCO REFERENCIAL	1
1.1. Antecedentes	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Descarbonización en el mundo	5
2.1.1. Medidas de emisiones de CO ₂	6
2.1.2. Compromisos	7
2.1.3. Sector energía	9
2.1.4. Sector transporte	10
2.1.5. Factores de emisiones de CO ₂ e	10
2.2. Matriz energética	11
2.2.1. Definición	12
2.2.2. Potencia y energía	13
2.2.3. Cálculo	13
2.2.4. Planeación	17
2.3. Transporte público	19

2.3.1.	Capacidad	20
2.3.2.	Diversificación	21
2.4.	Trenes eléctricos	22
2.4.1.	Tipos de trenes.....	23
2.4.2.	Consumos de energía	26
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	31
3.1.	Características del estudio	31
3.2.	Unidades de análisis	32
3.3.	Variables	33
3.4.	Fase del desarrollo de la investigación	34
3.4.1.	Fase 1: recolección y organización de información	35
3.4.2.	Fase 2: análisis de la capacidad de la matriz energética.....	43
3.4.2.1.	Definición variable 1	44
3.4.2.2.	Definición variable 2	44
3.4.2.3.	Definición variable 3	45
3.4.2.4.	Paso 1	46
3.4.2.5.	Paso 2	47
3.4.2.6.	Paso 3	47
3.4.3.	Fase 3: trenes eléctricos en el transporte público para la reducción de emisiones de CO ₂	50
3.4.3.1.	Definición de variable 1	50
3.4.3.2.	Definición de variable 2	51
3.4.3.3.	Definición de variable 3	51
3.4.3.4.	Paso 1	52
3.4.3.5.	Paso 2	53
3.4.3.6.	Paso 3	54
3.4.3.7.	Paso 4	56

3.4.3.8.	Paso 5	57
3.4.4.	Fase 4: acciones para la matriz energética ante un sistema de trenes eléctricos en el transporte público	59
3.4.4.1.	Paso 1	59
3.4.4.2.	Paso 2	61
3.5.	Técnicas de análisis de información	61
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	63
4.1.	Matriz energética nacional ante la integración de trenes eléctricos.	63
4.1.1.	Matriz energética 2016 - 2032	63
4.1.2.	Ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala ..	64
4.1.3.	Sistema de trenes eléctricos para el transporte público.	64
4.1.4.	Energía consumida por sistemas de trenes eléctricos.....	66
4.1.5.	Tendencia de cargas al año 2032.....	67
4.1.6.	Potencia demandada del sistema de trenes	68
4.1.7.	Capacidad de la matriz energética nacional	70
4.2.	Reducción de emisiones de CO ₂ por la implementación de trenes eléctricos en el transporte público	71
4.2.1.	Tendencia del parque vehicular terrestre en Guatemala	72
4.2.2.	Emisiones de CO ₂ en el sector energía de Guatemala	74
4.2.3.	Actividad en recorrido por parte del transporte terrestre	76

4.2.4.	Emisiones de CO ₂ producidas por el transporte público de Guatemala	77
4.2.5.	Contribución de la ruta de estudio en mitigar las emisiones de CO ₂	78
4.2.6.	Ánálisis de las emisiones de CO ₂ por parte del transporte privado en la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala	79
4.2.7.	Ánálisis de las emisiones de CO ₂ por parte del transporte público en Guatemala	82
4.2.8.	Ánálisis de las emisiones de CO ₂ por parte del transporte privado en Guatemala	84
4.3.	Identificación de acciones en la matriz energética ante el desafío de soportar un sistema de trenes en el transporte público, en la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.....	85
4.3.1.	Necesidad de incrementar la capacidad de la matriz energética planteada al año 2032, por la implementación de trenes en la ruta de estudio.	85
4.3.2.	Ánálisis del plan de energía del MEM, por los consumos del sistema de trenes propuesto en la ruta de estudio.....	87
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	89
5.1.	Resultado de la matriz energética nacional ante la integración de trenes eléctricos.....	89
5.2.	Contribución en la reducción de emisiones de CO ₂ por la implementación de trenes eléctricos en el transporte público	92

5.3. Acciones para que la capacidad de la matriz energética pueda soportar un sistema de trenes en el transporte público, en la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala	99
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS	105
ANEXOS	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Generación por tipo de tecnología disponible para la matriz energética de Guatemala para el año 2022	11
2.	Matriz de generación eléctrica de Guatemala para 2016.....	16
3.	Matriz de generación eléctrica de Guatemala para 2016, por generación renovable y no renovable	17
4.	Tendencias de emisiones y compromisos de contribuciones de Guatemala.....	43
5.	Proyección de capacidad de matriz energética 2016-2032.....	67
6.	Capacidad Instalada de la matriz energética 2032	70
7.	Capacidad máxima aprovechable vs demanda de sistema de trenes eléctricos	71
8.	Tendencia anual de la cantidad de unidades de transporte terrestre en Guatemala.....	73
9.	Tendencia anual de la cantidad de unidades de transporte público en Guatemala.....	74
10.	Tendencia de emisiones CO ₂ e de NDC y tendencia de sector energía y subsectores transporte y generación eléctrica	76
11.	Emisiones de Guatemala 2032 sustituyendo al transporte público actual por trenes eléctricos en la ruta de estudio	79
12.	Emisiones de CO ₂ de Guatemala estimados para el año 2032	80
13.	Tendencia anual de la cantidad de unidades de transporte público en Guatemala y el privado en la ruta de estudio	81

14.	Implementación de trenes eléctricos en la ruta de estudio y su impacto indirecto en la reducción de emisiones de CO ₂ en 2032.....	82
15.	Análisis del grado de contribución en la reducción de emisiones de CO ₂ por el transporte público urbano en 2032.....	83
16.	Análisis del grado de contribución en la reducción de emisiones de CO ₂ por el transporte público total en 2032	83

TABLAS

I.	Proyección de plantas por agregarse, según el recurso aprovechable, al parque de generación guatemalteco	19
II.	Variables del estudio ordenadas de forma teóricas	33
III.	Variables del estudio ordenadas de forma operativa	33
IV.	Capacidad total instalada de las centrales generadoras de Guatemala del año 2016 al 2020.....	35
V.	Capacidad total instalada de las centrales generadoras de Guatemala por tipo de tecnología del año 2016 al 2020.....	36
VI.	Capacidad total instalada de las centrales generadoras de Guatemala por fuente de energía del año 2016 al 2020.....	36
VII.	Energía en Guatemala del año 2016 al 2020.	36
VIII.	Energía en Guatemala por tipo de tecnología del año 2016 al 2020.	37
IX.	Energía en Guatemala por fuente de energía del año 2016 al 2020.	38
X.	Centrales de generación a incorporarse por plan 2016-2032.....	38
XI.	Cantidad y distribución de horarios de transporte público en ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala	40
XII.	Características técnicas de tren de larga distancia serie 130	40
XIII.	Emisiones de CO ₂ e del sector energía y subsectores transporte y generación eléctrica de Guatemala.	41

XIV.	Resumen de la tendencias de emisiones y los compromisos de contribuciones de Guatemala.....	42
XV.	Definición de variables para análisis de la matriz energética	48
XVI.	Simbología para ecuación 25.....	52
XVII.	Matriz energética de Guatemala proyectada al 2032	63
XVIII.	Transporte público en ruta de estudio	64
XIX.	Propuesta de distribución de horarios de trenes eléctricos en ruta de Antigua Guatemala a Ciudad de Guatemala.....	65
XX.	Consumo de energía anual del sistema de trenes propuesto	66
XXI.	Capacidad total instalada de las centrales generadoras de Guatemala del año 2016 al 2020	68
XXII.	Capacidad instalada de las centrales generadoras de antes a la implementación de un sistema de trenes eléctricos.	69
XXIII.	Capacidad máxima de matriz energética	70
XXIV.	Datos y tendencia de unidades de transporte terrestre, transporte público de Guatemala	72
XXV.	Emisiones de CO ₂ del sector energía y sus subsectores transporte y generación eléctrica de Guatemala.....	75
XXVI.	Recorrido diario por parte del transporte terrestre en área urbana, extraurbana y ruta de estudio.....	77
XXVII.	Emisiones de CO ₂ e por el transporte público de Guatemala	78
XXVIII.	Emisiones de CO ₂ e por el transporte privado en la ruta de estudio Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala	80
XXIX.	Emisiones de CO ₂ e por el transporte privado en Guatemala	84
XXX.	Matriz Energética proyectada al 2032 contra el consumo de energía anual del sistema de trenes propuesto.....	87
XXXI.	Parámetros de sistema de trenes propuesto para la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala	90

X

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C	Capacidad de asientos del tren
ECd	Consumo de energía promedio para un viaje completo
CA	Corriente alterna
CO₂	Dióxido de carbono
CO_{2e}	Dióxido de carbono equivalente
E	Energía
Es	Energía consumida por asiento por kilómetro
Ep	Energía consumida por pasajero por kilómetro
Ev	Energía consumida por vehículo por kilómetro
EC(t)	Energía consumida variable en el tiempo
ECre	Energía regenerada
ECre(t)	Energía regenerada variable en el tiempo
β	Factor de pérdida del sistema de transmisión de tren
GEI	Gases de efecto invernadero
GWh	Giga vatio hora
Hz	Hercio
SF₆	Hexafluoruro de azufre
HFCs	Hidrofluorocarbonos
h	Horas
km	Kilómetro
kW	Kilovatio
kV	Kilovoltio
d	Longitud del viaje en (km)

MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
CH₄	Metano
m	Metro
N₂O	Óxido de nitroso
∀	Para todo caso
PFCs	Perfluorocarbonos
P	Potencia
α01 × β1 + α02 × β2	Potencia de cabecera de tren
HEP	Potencia de cabecera de tren (<i>head-end power</i>)
P(t)	Potencia en el tiempo
P< 0	Potencia en las ruedas negativa
P> 0	Potencia en las ruedas positiva
Q	Quetzales
Σ_{i=1}ⁿ x	Sumatoria desde valor i al valor final n de la variable x
Σt	Sumatoria total
tCO₂e/cápita	Toneladas métricas de dióxido de carbono per cápita
Ms	Total de kilómetros por asiento
Mp	Total de kilómetros por pasajero
Mv	Total de kilómetros por vehículo
α02	Variable de inicio de movimiento
α01	Variable de movimiento
β1	Variable ficticia 1
β2	Variable ficticia 2
W	Watt

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista, operador del sistema eléctrico nacional de Guatemala.
Capacidad	Potencia total disponible en la matriz energética.
Cargas	Potencia que necesita un dispositivo, sistema, sector, o región de la red eléctrica.
Consumo	Energía que requiere una carga eléctrica, dispositivo, sector, o región de la red eléctrica en determinado tiempo.
Demanda	Potencia que requiere una carga eléctrica, dispositivo, sector, o región de la red eléctrica.
Dióxido de carbono	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.
Energía renovable	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.

Fuentes renovables	Recursos abundantes en la tierra, que después de su uso se renueva para seguir siendo aprovechado.
GEI	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.
HEP	<i>Head-end power</i> , traducido al español como potencia de cabecera para un tren eléctrico.
MEM	Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i> , que en español se ha traducido como Contribuciones determinadas a nivel nacional.
NTD	<i>National Transit Database</i> , de Chicago, Estados Unidos, en español se traduce como base de datos de tránsito nacional.
NTGDR	Norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación renovable.
ONU	Organización de Naciones Unidas.

RESUMEN

Las emisiones de dióxido de carbono producidas por el transporte público guatemalteco han persistido desde su implementación, aun cuando se cuenta con tecnologías eléctricas en el mercado para su diversificación. Por esta razón, en este estudio, se analiza la diversificación del transporte público, incorporando trenes eléctricos, identificando la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, y el grado de contribución que representa para Guatemala.

La ruta de estudio es Antigua Guatemala a Ciudad de Guatemala, en donde se ensaya la implementación de trenes eléctricos, y se analiza su impacto técnico en la matriz energética del plan nacional de energía.

Con base en recopilación y ordenamiento de información oficial para las variables de estudio, y encontrando relación entre ellas, se obtiene como resultado, la cantidad de trenes eléctricos que es capaz de soportar la matriz energética, sin comprometer la demanda eléctrica de otros sectores del país, indicando la posibilidad de implementar un proyecto de esta magnitud.

También se identifica la cantidad de emisiones de CO₂ que representa la actividad de transporte público de la ruta estudiada, mostrando el aporte que tendría para Guatemala, promover el uso del transporte público.

Con base en los resultados encontrados, se identifica si se deben tomar en cuenta acciones para mantener una seguridad energética en el plan nacional de energía, y se recomienda al Gobierno de Guatemala, en donde debe enfocar sus esfuerzos para cumplir los compromisos pactados en su NDC ante la ONU.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aún no ha sido posible realizar una diversificación en el transporte público, involucrando trenes eléctricos ante la persistencia de emisiones de CO₂ 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.

- 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.

- Formulación del problema
 - Pregunta central
 - ¿Cuál es la 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?
- Delimitación del problema

Para analizar a la matriz energética en cuanto a robustez y capacidad de soportar cargas adicionadas 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.

OBJETIVOS

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.

Específicos

1. 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.
2. 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.
3. 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.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La investigación se ha desarrollado siguiendo las técnicas de investigación aplicables para este estudio.

- Características del estudio

El enfoque del estudio es cuantitativo, no experimental, con alcance descriptivo.

- Unidades de análisis

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

- Variables principales

Las variables tratadas en la investigación son la potencia de la matriz energética nacional, demanda de potencia de sistema de trenes, emisiones de CO₂e, cantidad de transporte público, usuarios de transporte público, entre otras.

- Fases de estudio

El estudio fue realizado en cuatro fases, la primera fase fue de revisión teórica, recolección de datos, y ordenamiento de datos preparados para que en la segunda fase fuera analizada la matriz energética nacional, actual y la

proyectada al 2032 en el plan de energía, encontrando su máxima capacidad de soportar un sistema de trenes eléctricos.

En la tercera fase se analizó el aporte en la reducción de las emisiones de CO₂ por parte del transporte público, con la implementación de un sistema de transporte de trenes eléctricos, este análisis se realizó en la ruta de estudio, y en las actividades del transporte público urbano y extraurbano.

La cuarta fase analiza las acciones sugeridas para la matriz energética nacional, en el plan de energía 2017 -2032 para apoyar la implementación de un sistema de trenes eléctricos para la reducción de las emisiones de CO₂ del subsector transporte.

- Técnicas de análisis de información

Para la evaluación de la información, se han ordenado y presentado en tablas, con los años conocidos, y emplean funciones tendencia para los años no conocidos dentro del periodo del estudio, y según los tipos de variable, estas funciones fueron discretas o continuas, acotadas en el periodo de estudio como dominio.

Para los resultados obtenidos del estudio también se presentan las gráficas con tendencia lineal, en donde se puede apreciar la relación y asociación entre una variable y otra.

INTRODUCCIÓN

La línea de investigación que sigue este estudio es Energías Renovables e Incidencia en la matriz energética de Guatemala, formando parte del área de investigación; análisis y tendencias en la matriz energética nacional, regional y global, en donde se aborda la evaluación de diversificar el transporte público de Guatemala, permitiendo observar, cuánto puede aportar este subsector al plan nacional de energía, en la búsqueda de reducir las emisiones de CO₂ al ambiente, tomando como ensayo, tan solo una ruta.

Según las fuentes y producción de energía por parte de Guatemala, este no es productor del combustible que se consume en el subsector transporte, 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. Dando como razón, un análisis en la capacidad de la matriz energética ante escenarios de demanda de un sistema de trenes eléctricos para el transporte público.

La investigación, se basa en teorías de electricidad, relacionadas con potencia y energía de la matriz energética, y técnicas de dimensionamiento de la capacidad del transporte y su diversificación. Tomando como premisas o metas, los compromisos de descarbonización por parte de Guatemala, los fundamentos teóricos, y los datos recopilados son debidamente citados y ampliados para su búsqueda en la sección de referencias.

Este estudio se clasifica como 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 demanda.

Y en la siguiente fase, la de implementación de ensayos de transporte para la reducción de emisiones de CO₂, se podrá determinar la cantidad de trenes eléctricos que son necesarios implementar, para reducir las emisiones de CO₂ 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 para interpretación de resultados.

La investigación tiene una estructura de cinco capítulos de contenido, el primero presenta un marco referencial, seguido del capítulo de fundamentos teóricos e información oficial nacional e internacional, para luego abordar el capítulo tres que tratará del desarrollo de la investigación, el cuarto capítulo muestra los resultados obtenidos del desarrollo de investigación presentado en el capítulo tres y, por último, en el capítulo cinco se discuten los resultados obtenidos de la investigación.

Para todo trato teórico y cada fase del estudio, es necesario conocer y evidenciar la existencia de los estudios previos que validan las variables tratadas, fundamentando la base de la investigación con las premisas para el caso de estudio, estos se encuentran en el siguiente capítulo, marco referencial.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

La descarbonización del planeta por medio de la matriz energética ha sido la 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 (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 el 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 (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 ferreos, aplicada a trenes de cercanía, usando modelos parametrizables para las horas de alta y baja demanda del sistema” (p. 1).

También se aclara cómo 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. Despues 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 Wang y Rakha (2017).

Al 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 consultas de publicaciones de Rúa, Arango y Larsen (2017).

2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo contiene conceptos teóricos que soportan la investigación.

2.1. 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 (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 (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 CO₂ 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 (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFCs), el hexafluoruro de azufre (SF₆) y los perfluorocarbonos (PFCs) entre otros, de acuerdo con Montzka, Dlugokencky, y Butler (2011).

2.1.1. Medidas de emisiones de CO₂

Como se indicó anteriormente, el CO₂ es uno de los gases del grupo de gases de efecto invernadero que aportan a los cambios climáticos en el planeta, dado que no es el único, es importante encontrar una equivalencia en cuanto a el mismo forzamiento radioactivo de cada uno de los otros gases en relación con el CO₂.

La definición de CO₂ equivalente obtenida del Ministerio de Energía y Minas (2017c) es la “concentración de CO₂ que produciría el mismo nivel de forzamiento radiactivo que una mezcla dada de CO₂ y otros gases de efecto invernadero” (p. 14).

Y en cuanto a las emisiones de CO₂, se tiene la siguiente definición relacionada con la cantidad:

Cantidad de emisión de dióxido de carbono que causaría el mismo forzamiento radiactivo igual a una cantidad emitida de un gas de efecto invernadero mezclado homogéneamente, todo ello multiplicado con su respectivo potencial de calentamiento mundial para tener en cuenta los diferentes períodos de tiempo que permanecen en la atmósfera (Ministerio de Energía y Minas, 2017c, p. 14)

En la mayoría de los informes estadísticos, planes y revistas de los diferentes sectores del país, regiones y el planeta, se encuentra el aporte de emisiones en CO₂ equivalente, abreviado como CO₂e, en donde ya se toma en cuenta todos los gases de efecto invernadero que afectan a la atmósfera.

2.1.2. 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).

En cuanto al 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, en países desarrollados ya existe experiencia 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 el documento *Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional* de Gobierno de Guatemala (2014) “Guatemala contribuye con menos del 0.1 % de las emisiones mundiales y sus emisiones son 2.48 tCO₂e/cápita, al año 2005 cifra considerablemente menor al promedio de las emisiones per cápita de la región de Latinoamérica y el Caribe (4.6 tCO₂e/cápita)” (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 CO₂ 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 CO₂ 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). 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).

La condición expuesta por Guatemala para el cumplimiento de esta meta ambiciosa es obtener apoyo técnico y financiero de recursos internacionales, según el Gobierno de Guatemala (2014).

2.1.3. 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).

2.1.4. 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 CO₂ 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)

2.1.5. Factores de emisiones de CO₂e

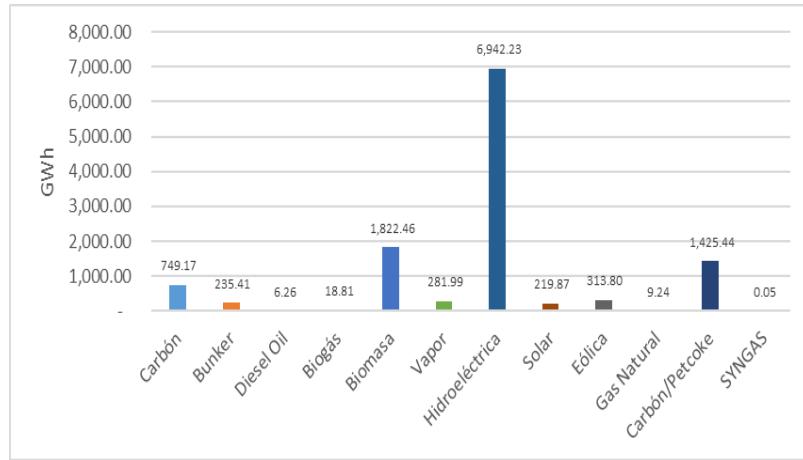
Es importante conocer las emisiones de las diferentes actividades de producción y consumos de energía en el país, el Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático, con siglas SNICC, es el encargado de realizar los inventarios de estas emisiones por parte de todos los sectores del país.

Por otro lado el Ministerio de Energía y Minas contabiliza las emisiones del sector energía por el tipo de actividad, definiendo las emisiones (*Emisiones*) como el resultante del producto el Dato obtenido por la actividad energética (*DA*) y el Factor de Emisiones (*Fe*), del mismo modo el Factor de Emisiones es nombrado como Coeficiente de emisión, y tiene como dimensionales [*Kg CO₂e/KWh*], que indica la cantidad de CO₂ equivalente en Kilogramos por cada Kilo Watts hora de energía de actividad.

2.2. Matriz energética

La generación de energía eléctrica proviene de la transformación de diferentes formas de energía, en su mayoría cinética rotacional, entre otras, en la figura 1 y 2 se muestran la matriz energética de Guatemala.

Figura 1. Generación por tipo de tecnología disponible para la matriz energética de Guatemala para el año 2022



Fuente: elaboración propia, con datos de AMM (2023). *Sítio web Generación por tipo de recurso (GWh)*.

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

2.2.1. 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, 2019c, 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 (2017c).

2.2.2. Potencia y energía

En el contexto del mercado eléctrico es importante notar la diferencia entre potencia y energía, la relación que existe entre ellas y las actividades asociadas a cada una de ellas.

Según la revista Mercado Eléctrico de Guatemala publicado por el Administrador del Mercado Mayorista (2020), existen dos productos transados en el mercado eléctrico mayorista nacional, estos son potencia y energía, donde sus definiciones son:

“Potencia: rapidez con que la energía es transformada en trabajo o convertida a otra forma de energía” (Administrador del Mercado Mayorista, 2020, p. 10). Como complemento, algunos términos y actividades relacionadas con la potencia eléctrica empleados a lo largo de esta investigación son demanda de potencia, carga eléctrica, capacidad, matriz de capacidad energética, entre otros.

“Energía: atributo físico que puede ser convertido en trabajo útil o convertido a otra forma de energía. Cuando una corriente eléctrica fluye en cualquier circuito, puede transferir energía al hacer un trabajo mecánico o termodinámico” (Administrador del Mercado Mayorista, 2020, p. 10). Como complemento, algunos términos y actividades relacionadas con la energía eléctrica empleados a lo largo de esta investigación son demanda de energía, consumo eléctrico, matriz energética, entre otros.

2.2.3. 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 (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 hidrógeno, 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 (2017c).

De acuerdo con este mismo plan del Ministerio de Energía y Minas (2017c), la generación por cada tipo de recurso para el año 2016 fue como se muestra en la figura 2.

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

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

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

Matriz Energética de Guatemala (año 2016)

$$\begin{aligned} &= \text{Capacidad de Carbon} + \text{Capacidad de Bunker} \\ &+ \text{Capacidad de Diesel} + \text{Capacidad de Biogás} \\ &+ \text{Capacidad de Biomasa} + \text{Capacidad de Geotérmica} \\ &+ \text{Capacidad de Hidroeléctrica} + \text{Capacidad de Solar} \\ &+ \text{Capacidad de Eólica} \end{aligned} \quad (1)$$

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

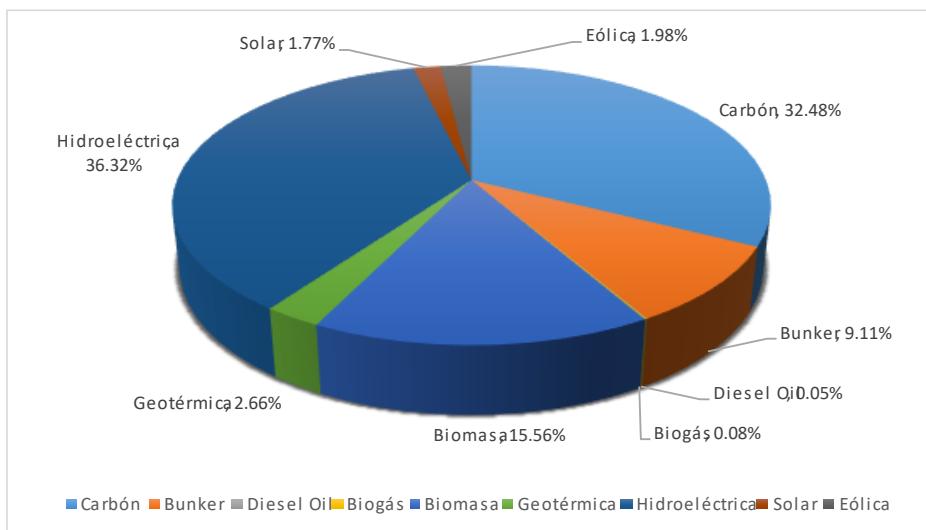
Matriz Energética de Guatemala (año 2016)

$$\begin{aligned} &= 3,533 \text{ GWh} + 991 \text{ GWh} + 5 \text{ GWh} + 9 \text{ GWh} \\ &+ 1,693 \text{ GWh} + 289 \text{ GWh} + 3951 \text{ GWh} + 192 \text{ GWh} \\ &+ 215 \end{aligned}$$

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

Con estos datos es posible graficar la matriz energética, y se muestra en la figura 2.

Figura 2. Matriz de generación eléctrica de Guatemala para 2016

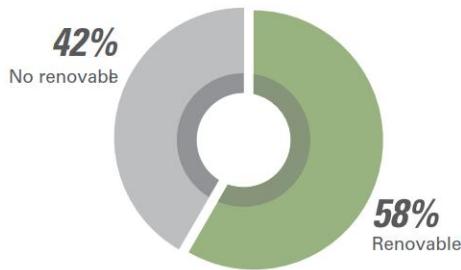


Fuente: elaboración propia, empleando información del Ministerio de Energía y Minas (2017c).

Plan nacional de energía 2017-2032.

En el plan Nacional de Energía 2017-2032 del Ministerio de Energía y Minas (2017c), 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 figura 3 muestra la matriz energética publicada por el MEM.

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



Fuente: elaboración propia, empleando información del Ministerio de Energía y Minas (2017c).
Plan nacional de energía 2017-2032.

2.2.4. Planeación

La diversificación de la matriz energética, generación eléctrica con potencial geotérmico, adición de generadores distribuidos renovables y plantas, usuarios autoproductores 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 (2017c), que afectan directamente a la matriz energética que Guatemala está planteando.

Con el objetivo según el Ministerio de Energía y Minas (2017c):

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 de Gases de efecto invernadero (GEI) con un enfoque de sostenibilidad en el uso y aprovechamiento de la energía. (p. 60)

Las acciones de todos los ejes planteados en el Plan Nacional de Energía buscan dar cumplir el 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, 2017c, 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, 2017c, 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, 2017c, p. 66).

La tabla I muestra la distribución de la potencia proyectada a agregarse al parque de generación actual.

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

Recurso	Cantidad	MW
Agua	66	3,550.28
Geotermia	3	300.00
Sol	8	187.00
Híbridos	4	316.00
Eólico	3	101.00
Bunker	4	445.00
Carbón	2	600.00
Gas natural (IMP)	4	603.00
Total	94	6,102.28

Fuente: elaboración propia, empleando información del Ministerio de Energía y Minas (2017c). *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.

2.3. 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, 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.

2.3.1. 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).

2.3.2. 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 terrestres pueden ser, buses eléctricos, buses eléctricos para transporte urbano y carretera, trenes eléctricos y transporte ferroviario para largas distancias.

Respecto a las acciones del Plan Nacional de Energía 2017-2032 del Ministerio de Energía y Minas, (2017c) 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, 2017c, 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, 2017c, 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, 2017c, 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, 2017c, p. 88).

2.4. Trenes eléctricos

La diversificación del transporte público permite proponer diferentes tipos 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.

2.4.1. 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 están 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 estos 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 planteados por Zhang, Jia, Wang, y Xu (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.

2.4.2. 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.

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).

Las variables empleadas son:

- E: es el consumo de energía anual de un sistema de transporte ferroviario en kW h
- M_p : es el total de kilómetros por pasajero
- M_s : es el total de kilómetros por asiento
- M_v : es el total de kilómetros por vehículo
- C: es la capacidad de asientos del tren
- B: es el factor de línea asociado con el sistema de transmisión del tren

$$E_p = \frac{E}{M_p \times \beta}; E_p \text{ es la energía consumida por pasajero kilómetro } \left(\frac{kW h}{P} \cdot km \right) \quad (2)$$

$$E_s = \frac{E}{M_s \times C \times \beta}; E_s \text{ es la energía consumida por asiento kilómetro } \left(\frac{kW h}{S} \cdot km \right) \quad (3)$$

$$E_v = \frac{E}{M_v \times \beta}; E_v \text{ es la energía consumida por vehículo kilómetro } \left(\frac{kW h}{P} \cdot km \right) \quad (4)$$

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 (6) (consumo de energía) y la ecuación (7) (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 ($ECre$), solo se considera la potencia negativa.

Las variables empleadas en la ecuación 8 son:

- $(\alpha_{01} \times \beta_1 + \alpha_{02} \times \beta_2)$: es la potencia de cabecera HEP
- β_1 : variable ficticia iguales a 0 ó 1
- β_2 : variable ficticia iguales a 0 ó 1

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 (α_{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).

$$EC(t) = \begin{cases} \alpha_{01} \times \beta_1 + \alpha_{02} \times \beta_2 + P(t), & \forall P(t) > 0 \\ \alpha_{01} \times \beta_1 + \alpha_{02} \times \beta_2, & \forall P(t) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$EC_{re}(t) = \begin{cases} P(t) \times \eta_{rb}(t), & \forall P(t) < 0 \\ 0, & \forall P(t) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

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 ecuación 8, siendo d la longitud del viaje (km), según lo plantean Wang y Rakha (2017).

$$EC_d [kWh / V \cdot km] = \frac{\sum_t [EC(t) + EC_{re}(t)]}{d} \quad (7)$$

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.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la investigación ha sido clasificado de acuerdo con sus características de estudio, indicando la unidad de análisis, las variables y sus diferentes fases de desarrollo.

3.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo, ya que las variables generales tratadas son las emisiones de dióxido de carbono por parte del transporte público y la capacidad de la matriz energética, ambas variables son deducibles a partir de información publicada por diferentes instituciones.

El alcance es descriptivo, dado que la investigación expone 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 CO₂ 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 empleadas para este cálculo están relacionadas e implican causalidad unas con otras.

El diseño adoptado por la investigación es 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 energéticas planteados a futuro son expuestos por el Ministerio de Energía y

Minas no manipulables, con estos datos se busca comprobar si estos datos son capaces de adoptar escenarios de altas cargas de trenes eléctricos, sin comprometer la demanda de otros sectores de consumo en el país.

También se planteó la investigación en una clasificación de periodo transaccional dado que se exploran los datos de la matriz energética en tres momentos puntuales, 2016, año en el que se emitió el plan nacional de energía, año 2020, como escenario más reciente actual y año 2032, año en el que la matriz energética se ha proyectado 2032 en el plan de energía guatemalteco.

Los datos recolectados se comparan ante los escenarios de altas cargas de consumo de energía de los trenes eléctricos, buscando los efectos de causalidad en la matriz energética.

3.2. Unidades de análisis

El centro de estudio ha sido 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 expuso la matriz energética fueron definidos por las cargas eléctricas de alto consumo de energía, las cargas eléctricas son los trenes eléctricos.

3.3. Variables

Las variables del estudio se han clasificado en dos grupos de tablas, en la tabla II se indican y se ordenan con su naturaleza teórica, y en la tabla III se ordenan de forma operacional.

Tabla II. Variables del estudio ordenadas de forma teóricas

Criterio Variable	Cualitativa (categórica)		Cuantitativa (numérica)		Manipulable	Observable	Escala de medición
	Numérica	Policotómica	Discreta	Continua			
Emisiones de CO ₂				X		X	Razón
Rutas de transporte		X				X	Nominal
Cantidad de transporte público			X			X	Razón
Usuarios de transporte público			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

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla III. Variables del estudio ordenadas de forma operativa

Variable	Tipo de variable	Escala de medición	Dimensionales	Técnica
Emisiones de CO ₂	Cuantitativa (numérica) continua	Razón	TCO ₂ E	Investigación Tabulación Deducción y cálculo

Continuación tabla III.

Rutas de transporte	Cualitativa (categórica) Policotómica	Nominal	Km	Investigación Tabulación
Cantidad de transporte público	Cuantitativa (numérica) Discreta	Razón	Unidades	Investigación Tabulación
Usuarios de transporte público	Cuantitativa (numérica) Discreta	Razón	Personas	Investigación Tabulación
Demanda de potencia de transporte público	Cuantitativa (numérica) Continua	Razón	kW, MW	Investigación Tabulación Deducción y cálculo
Potencia de la matriz energética	Cuantitativa (numérica) Continua	Razón	kW, MW	Investigación Tabulación Deducción y cálculo
Tecnologías de la matriz energética	Cualitativa (categórica) Policotómica	Nominal	Sin dimensión	Investigación Tabulación Deducción y cálculo

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.4. Fase del desarrollo de la investigación

A continuación, se plantean las fases de investigación para este estudio.

3.4.1. Fase 1: recolección y organización de información

Este trabajo de investigación ha requerido una recolección de datos por parte de las diferentes entidades involucradas en el sector energía y transporte, los datos necesarios de la matriz energética se han tomado de las diferentes revistas publicadas por el Ministerio de Energía y Minas del año 2016 al 2020, y así como de las revistas de La Comisión Económica para América Latina (CEPAL), las tablas del IV al X muestran los datos recopilados.

Tabla IV. Capacidad total instalada de las centrales generadoras de Guatemala del año 2016 al 2020

Año	Potencia [MW]		Porcentaje máximo demandado de la capacidad instalada
	Capacidad Instalada	Demanda máxima	
2016	4,201.00	1,701.60	40.50 %
2017	4,068.80	1,749.50	43.00 %
2018	4,151.60	1,762.50	42.45 %
2019	4,108.60	1,785.40	43.46 %
2020	4,109.50	1,787.20	43.49 %

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

Tabla V. Capacidad total instalada de las centrales generadoras de Guatemala por tipo de tecnología del año 2016 al 2020

	2016	2017	2018	2019	2020
Total [MW]	4,201.10	4,068.90	4,151.70	4,108.70	4,109.60
Crecimiento %	12.77 %	-3.15 %	2.03 %	-1.04 %	0.02 %
Hidro	1,392.30	1,437.70	1,499.10	1,574.50	1,577.20
Geo	49.20	49.20	49.20	49.20	49.20
Eólica	75.90	75.90	107.40	107.40	107.40
Cogeneración	1,049.20	1,080.00	1,069.90	1,024.90	1,024.90
Solar	85.00	92.50	92.50	92.50	92.50
Biogás (GDR)	2.30	5.90	5.90	5.90	5.90
Térmica	1,547.20	1,327.70	1,327.70	1,254.30	1,252.50

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

También es conveniente tener clasificadas estas matrices de acuerdo con el tipo de tecnología y en su fuente de energía, renovable y no renovable.

Tabla VI. Capacidad total instalada de las centrales generadoras de Guatemala por fuente de energía del año 2016 al 2020

Fuente de Energía	2016	2017	2018	2019	2020
Renovable [MW]	2,653.80	2,741.10	2,823.90	2,854.30	2,857.00
No renovable [MW]	1,547.20	1,327.70	1,327.70	1,254.30	1,252.50
Renovable [%]	63.17 %	67.37 %	68.02 %	69.47 %	69.52 %
No renovable [%]	36.83 %	32.63 %	31.98 %	30.53 %	30.48 %

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

Tabla VII. Energía en Guatemala del año 2016 al 2020

Año	Energía [GWh]		
	Producida /Demandada	Exportación	Importación
2016	10,877.90	1,334.80	746.90
2017	11,489.90	1,857.80	891.40
2018	12,522.40	2,500.40	825.70
2019	12,228.20	2,190.00	1,140.50
2020	11,122.00	1,156.00	1,084.60

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

Tabla VIII. Energía en Guatemala por tipo de tecnología del año 2016 al 2020

	2016	2017	2018	2019	2020
Total [GWh]	10,877.90	11,489.90	12,522.40	12,228.20	11,122.10
Crecimiento %	5.60 %	5.60 %	9.00 %	-2.30 %	-9.00 %
Hidro	3,951.30	5,765.30	5,191.00	4,381.10	5,816.50
Geo	289.10	253.00	249.80	262.10	273.90
Eólica	215.10	218.10	319.50	330.80	312.70
Biomasa	1,769.40	1,418.20	1,701.50	1,861.00	1,718.00
Solar	191.80	198.20	208.30	233.40	221.50
Biogás	8.60	17.60	26.30	24.70	30.00
Térmica	4,452.60	3,619.50	4,826.00	5,135.10	2,749.60

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

Para los datos de la matriz energética 2032, se ha tomado como base el Plan Nacional de Energía 2017-2032 emitido por el Ministerio de Energía y Minas.

Tabla IX. Energía en Guatemala por fuente de energía del año 2016 al 2020

Fuente de Energía	2016	2017	2018	2019	2020
Renovable [GWh]	6,425.30	7,870.40	7,696.40	7,093.10	8,372.50
No renovable [GWh]	4,452.60	3,619.50	4,826.00	5,135.10	2,749.60
Renovable [%]	59.07 %	68.50 %	61.46 %	58.01 %	75.28 %
No renovable [%]	40.93 %	31.50 %	38.54 %	41.99 %	24.72 %

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

Según la tabla I, de la sección 2.2.4 del marco teórico, al 2032 se habrán sumado 6,102.28 MW de capacidad de centrales de energía renovable y no renovable a la matriz energética 2016, estas centrales nuevas estarán produciendo energía en un estimado de 16,153 GWh. Estos datos se resumen y se calculan desde la matriz 2016 de potencia y energía (tablas V y VIII respectivamente), resultando la tabla X.

Tabla X. Centrales de generación a incorporarse por plan 2016-2032

Fuente	MW	Porcentaje	GWh	Participación
Renovable	4,454.28	73 %	10,874.48	67 %
No renovable	1,648.00	27 %	5,278.52	33 %
Total a sumarse	6,102.28		16,153.00	

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

Para determinar la cantidad de unidades de transporte público que hay en el país, se ha consultado la página de la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT), donde se obtuvo la información del parque vehicular de cada año, desde el año 2016 al año 2021, a partir de esos datos se ha hecho una proyección del cambio en la cantidad de las unidades de transporte de año con año hasta el 2032, tomando como base la función característica que arrojan los datos reales.

De las bases de datos publicadas por la SAT, es importante mencionar que en la descripción tipo vehículo se contabilizaron las unidades que se clasifican como autobús, autobús escolar, bus, bus escolar, microbús, microbús escolar, minibús y ómnibus.

Una vez contabilizado el transporte colectivo, se clasifica en, urbano y extraurbano, buscando dentro de la descripción nombre departamento, se seleccionó la clasificación Guatemala para contabilizar las unidades urbanas, y el resto de los departamentos del país complementan el transporte público extraurbano.

Los resultados de estas clasificaciones y funciones tendencia se muestran en la tabla XXIV, y figuras 8 y 9 de la sección 4.2.1 de los resultados.

En cuanto a la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, se ha obtenido información con poca transparencia en los datos por parte de la DGT, aunque se ha solicitado la información por año, tan solo se cuenta con la información del año 2022, dicha información se toma de los anexos del 2 al 6 y se presentan en la tabla XI, indicando cantidad de unidades y distribución de horarios de viaje, La ruta de estudio tiene 48 km de trayectoria en carretera de centro a centro.

Tabla XI. Cantidad y distribución de horarios de transporte público en ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala

Empresa	Horario de salida		Cantidad de unidades	
	Origen	Destino	Viajes ida	Viajes vuelta
Primorosa	05:30	10:00	3	3
Primorosa	06:00	11:00	3	3
Orellana	08:10	12:10	7	7
Orellana	08:20	12:20	7	7
Orellana	08:30	12:30	7	7
Orellana	14:40	17:00	7	7
Orellana	14:50	17:10	7	7
Orellana	15:00	17:20	7	7
Primorosa	15:15	18:00	3	3
Primorosa	16:00	18:15	3	3

Fuente: elaboración propia, con datos de Dirección General de Transportes (2022). *Resolución No UIP-DGT-257-2022.*

Tabla XII. Características técnicas de tren de larga distancia serie 130

Descripción	Parámetro
Tracción	Eléctrica.
Cabezas motrices	2
Composición máxima	M + 11 R + M.
Tensión	25 kV CA
Potencia	4,800 kW CA
Motores	8 asíncronos.
Velocidad máxima	250 km/h
Freno eléctrico	2.400 kW
Plazas totales	299 usuarios
Plazas clase preferente	63 usuarios

Continuación tabla XII.

Plazas clase turista	236 usuarios
----------------------	--------------

Fuente: elaboración propia, con información de Renfe (2023). *Flota de trenes*.

<https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/flota-de-trenes/s-130>.

En cuanto al transporte eléctrico, se ha seleccionado la serie S-130 de largas distancias, las características técnicas del tren seleccionado para este estudio se resumen en la tabla XII, obtenidas del operador de trenes en España, Renfe.

Otro grupo de datos explorado es la información relativa a las emisiones de dióxido de carbono al ambiente, en la tabla XIII se resumen las emisiones por parte del sector energía y sus subsectores transporte y generación eléctrica, los datos fueron recopilados de las publicaciones del Balance Energético de Guatemala por parte del MEM.

Tabla XIII. Emisiones de CO₂e del sector energía y subsectores transporte y generación eléctrica de Guatemala.

Año	Emisiones totales del sector energía		Emisiones totales del subsector generación eléctrica [Toneladas]	Emisiones totales del subsector transporte terrestre [Toneladas]	Emisiones totales del subsector transporte terrestre [%] del sector energía por el subsector	[%] del sector energía por el subsector generación eléctrica
	[Toneladas]	[%]				
2016	18,460,000.00	44.69 %	6,078,878.00	9,230,000.0	50.00 %	32.93 %
2017	17,690,736.96	41.92 %	4,757,039.17	9,530,000.0	53.87 %	26.89 %
2018	18,080,357.14	41.95 %	5,348,169.64	9,720,000.0	53.76 %	29.58 %
2019	23,136,579.06	52.59 %	5,425,527.79	10,740,000.0	46.42 %	23.45 %
2020	17,837,837.84	39.74 %	3,594,324.32	9,900,000.0	55.50 %	20.15 %

Continuación tabla XIII.

2021	21,039,471.33	45.95 %	5,233,820.36	11,780,000.0	55.99 %	21.31 %
------	---------------	---------	--------------	--------------	---------	---------

Fuente: elaboración propia, con datos de Ministerio de Energía y Minas (2022). *Revistas de balance energético anuales.*

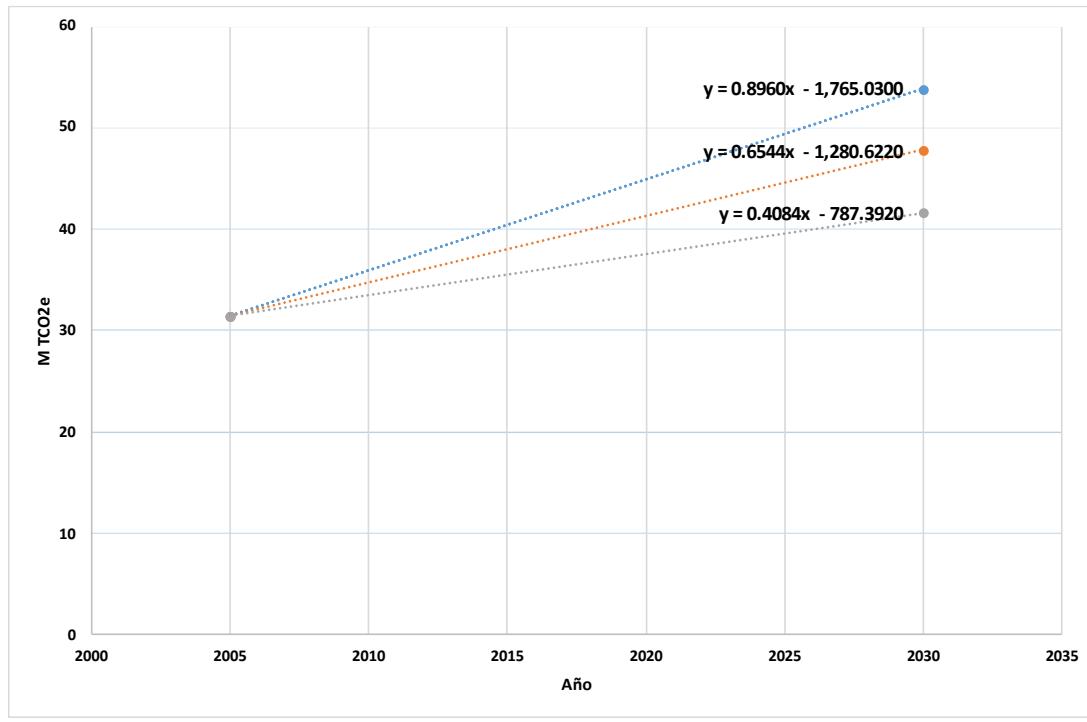
La NDC de Guatemala, presenta el reporte de emisiones del año 2005 como año base, y al 2030 como año de compromiso ante la ONU, en la tabla XII y la figura 4 se muestra el resumen de datos de la tendencia, propuesta no condicionada y propuesta condicionada.

Tabla XIV. Resumen de las tendencias de emisiones y los compromisos de contribuciones de Guatemala

Año	Tendencia	Millones de toneladas de CO ₂ e		
		Propuesta No	Propuesta	
		Condicionada	Condicionada	
Año base	2005	31.45	31.45	31.45
Año Meta	2030	53.85	47.81	41.66
Reducción de CO ₂ e	-	11.2 %	22.6 %	

Fuente: elaboración propia, con datos de Gobierno de Guatemala (2014). *Contribución prevista y determinada a nivel nacional.*

Figura 4. Tendencias de emisiones y compromisos de contribuciones de Guatemala



Fuente: elaboración propia, con datos de Gobierno de Guatemala (2014). *Contribución prevista y determinada a nivel nacional.*

Con la información recopilada y analizada se ha abordado el estudio de investigación, y se procedió a categorizar los datos según las variables utilizadas, quedando organizados para la interpretación del estudio.

3.4.2. Fase 2: análisis de la capacidad de la matriz energética

En esta fase se inicia indicando cómo se obtienen y trabajan las variables necesarias para este análisis, y luego se trabaja en pasos para poder encontrar el objetivo buscado.

3.4.2.1. Definición variable 1

La variable 1 es la matriz energética 2032 de Guatemala, planteada por el Ministerio de Energía y Minas, en el Plan Nacional de Energía.

Esta matriz se obtiene de la suma de potencia renovable, no renovable y energía del 2016, año base del plan, para ellos se usa la ecuación 1 definida en el marco teórico y la información presentada en la tabla I, y tablas del IV al X, obteniendo la matriz de potencia y energía indicadas en la tabla XVII en la sección 4.1.1 de los resultados.

3.4.2.2. Definición variable 2

La variable 2 es la ruta de transporte de Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala.

La cantidad de viajes anuales se calculan con un año calendario de 360 días, contando asuertos y feriados.

Respecto a la cantidad de usuarios, se toma en cuenta que en algunos viajes las unidades van casi vacías y en otros superan su capacidad de plazas para pasajeros sentados, y la cantidad máxima de plazas es para 54 pasajeros, se toma este número como promedio de usuarios por viaje.

Los datos de la tabla XI corresponden al año 2022, sin embargo, dado que no fue posible obtener mayor transparencia en la información de esta ruta, se define lo siguiente:

Para proyectar una tendencia en los datos de la ruta de estudio, se mantuvo 10 unidades para los años anteriores al 2022, desde el 2016, y para los años posteriores al 2022 se aplicó la misma tasa de cambio por año que corresponde al transporte extraurbano completo, redondeando el resultado al número entero superior, esto se refleja como resultado en la tabla XXIV de la sección 4.2.1 de los resultados.

Las funciones del 11 al 14, generadas con herramientas de pronóstico de Microsoft Excel de los datos conocidos de los años 2016 al 2021, son empleadas para calcular los datos de los años del 2023 al 2032, esto se refleja como resultado en la tabla XXIV y figuras 8 y 9, de la sección 4.2.1 de los resultados.

$$Transporte\ terrestre = 231080x - 5E+08 \quad (8)$$

$$Transporte\ público = 513.11x - 920366 \quad (9)$$

$$Transporte\ público\ urbano = 233.69x - 411766 \quad (10)$$

$$Transporte\ público\ extraurbano = 279.43x - 508600 \quad (11)$$

3.4.2.3. Definición variable 3

La variable 3 es el sistema de trenes eléctricos para el transporte público.

Se propone un sistema de trenes de 10 unidades, previendo contingencias y mantenimientos para las unidades, distribuidos en viajes y horarios como se muestra en la tabla XIX en la sección 4.1.3 de resultados.

Es importante mencionar que los parámetros relacionados con corriente alterna de la tabla XII están ligadas a una frecuencia operativa de 50 Hz, sin embargo, para este estudio se ha asumido que la frecuencia de 60 Hz no afectará los parámetros de potencia ni tensión eléctrica, por lo que son funcionales y compatibles con la matriz energética nacional.

También es importante indicar que el tren seleccionado de la tabla XII es de tecnología de frenado eléctrico regenerativo, sin embargo, para este estudio no se profundizará en el aporte de ahorros de consumos energéticos de esta tecnología.

3.4.2.4. Paso 1

Habiendo definido el sistema de unidades de transporte y su distribución de horarios, se procede a calcular los niveles de consumo de energía.

Con la cantidad de viajes anuales, el tiempo del tren en curso y la potencia nominal de cada unidad de tren, se puede definir la cantidad de energía que estaría demandando anualmente el sistema de trenes.

Para este cálculo se toma una posición conservadora al no contemplar dentro del consumo total, al sistema base que corresponde a las estaciones de espera, los sistemas de control, protección y monitoreo, ni los servicios auxiliares de cada vagón, relacionados con iluminación y aire acondicionado.

Con las consideraciones anteriores, se expone la ecuación que determina el nivel de consumos para el sistema de trenes de la ruta de estudio:

$$\text{Consumo Trenes} = (\# \text{ viajes}) * (\text{Tiempo de viaje}) * (\text{Potencia de tren}) \quad (12)$$

El resultado de esta ecuación se muestra en la tabla XX de la sección 4.1.4 de los resultados.

3.4.2.5. Paso 2

Se calcula la tendencia de crecimiento de cargas al año 2032.

Para el cálculo de tendencia de cargas se ha hecho uso de la tabla IV con los años 2016 al 2020 como años base, y la tabla XVII para valores proyectados de capacidad instalada al 2032.

Empleando herramientas pronóstico de Microsoft Excel, se obtiene la función $y = 414.82x - 832,926.48$, a partir de ella, se calculan los años no conocidos, los resultados de ello se muestran en la tabla XXI y figura 5, de la sección 4.1.5 de resultados.

3.4.2.6. Paso 3

Por último, se procedió a calcular la potencia demandada del sistema de trenes en MW, y adicionando a la demanda máxima por año, resultando la tabla XXII, mostrada en la sección 4.1.6 de los resultados.

Con estos datos es posible analizar la cantidad de trenes que es capaz de soportar la matriz energética nacional proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017-2032 del MEM.

Tabla XV. Definición de variables para análisis de la matriz energética

Descripción	Símbolo
Capacidad de matriz energética	CME
Capacidad instalada	CI
Potencia prevista por inestabilidad de fuentes renovables	Prnv
Cantidad de Trenes	Nt
Potencia nominal por tren	Pt
Demanda máxima del SIN	Dmax

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la tabla XV se define la simbología empleada para las variables en las ecuaciones de la 16 a la 19, que son las ecuaciones propuestas para analizar la matriz energética y su capacidad de soportar un sistema de trenes eléctricos.

$$CME = CI - Prnv \quad (13)$$

La tabla XVII de la sección 4.1.1 de los resultados, muestra que la matriz energética proyectada al año 2032, tendrá un porcentaje del 69 % de energía proveniente de fuente renovable, dado que la fuente renovable es inestable en el año e incluso en años estacionales, es importante estimar un porcentaje de inestabilidad.

Siendo conservadores con el trato de esta variable, y no comprometer a otros sectores de consumo en el país, el porcentaje propuesto es del 50 % de la

potencia instalada proveniente de fuente renovable, quedando definido de la siguiente manera:

$$Prnv = 34.5 \% CI \quad (14)$$

Para obtener el dato de la potencia máxima demandada por el sistema de trenes, se propone la siguiente ecuación:

$$CME = Nt * Pt + Dmax \quad (15)$$

Sin embargo, el dato que se necesita en este caso es el número de trenes que puede soportar la matriz energética nacional, por lo que se debe despejar de la ecuación 13, el término Nt , quedando de la siguiente manera:

$$Nt = \frac{(CME - Dmax)}{Pt} \quad (16)$$

Introduciendo los datos anteriormente expuestos, se obtiene la cantidad de trenes máxima soportados por la matriz energética, sin comprometer otros sectores de consumo.

$$Nt = \frac{(10,303.28 * (100 \% - 34.5 \%)) - 4387.15) MW}{4.8 MW}$$

$$Nt = 491$$

Esta cantidad de trenes obtenida es 49.1 veces el sistema propuesto, que fueron 10 trenes para el sistema de transporte público para la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Con este resultado se puede comprobar que los valores de porcentaje máximo demandado de la capacidad instalada indicados en la tabla XXII de la sección 4.1.5 de los resultados, cumplen con el criterio $Prnv = 34.5\% CI$.

Al cumplir con este criterio, se puede afirmar que, bajo este análisis, las matrices de cada año, comprendidas en el periodo 2016 al 2032, son capaces de soportar el sistema de trenes propuesto de 10 trenes propuesto para la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

3.4.3. Fase 3: trenes eléctricos en el transporte público para la reducción de emisiones de CO₂

Determinar la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público de la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, para que el país cumpla con el compromiso adquirido en su Contribución Nacional Determinada.

Para lograr este objetivo, es necesario definir las variables con los datos que participarán, y los pasos de cálculo hasta obtener el resultado final.

3.4.3.1. Definición de variable 1

Para esta sección se define como variable 1 al parque vehicular, esta información se obtuvo de la SAT, después de su clasificación y conteo por tipo, se obtuvo como resultado la tabla XXIV, y figuras 8 y 9 de la sección 4.2.1 de los resultados.

3.4.3.2. Definición de variable 2

La variable 2 es la cantidad de emisiones de CO₂ en el subsector transporte terrestre, a partir de las emisiones del sector energía e identificando las emisiones que produce el subsector generación eléctrica.

En la tabla XIII, se muestran los datos recolectados de los años 2016 al 2021, y a partir de ellos, se calculan los datos de los años del 2022 al 2032 por medio de las funciones tendencia del 22 al 24, generadas con las herramientas de proyecciones de Excel.

Las funciones tendencia y los resultados de emplearlas con los datos conocidos se muestran en la tabla XXV y la figura 10 de la sección 4.2.2 de los resultados.

$$\text{Tendencia emisiones del sector energía} = 932272x - 2E + 09 \quad (17)$$

$$\text{Tendencia emisiones del subsector transporte} = 525152x - 1E + 09 \quad (18)$$

$$\text{Tendencia emisiones del subsector generación eléctrica} = 102454x - 2E + 08 \quad (19)$$

3.4.3.3. Definición de variable 3

La variable 3 es el recorrido diario en km del transporte terrestre, para el área urbana, extraurbana y la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

En el plan 2017-2032 del Ministerio de Energía y Minas, (2017c) se indica que el transporte urbano tiene un recorrido promedio de 16.14 km diarios, mientras que para el transporte extraurbano se indica que el promedio es de 251.42 km. En cuanto a la ruta de Antigua Guatemala a Ciudad de Guatemala se tiene un recorrido de 48 km de trayectoria por carretera de centro a centro.

Dado que el recorrido indicado es un valor promedio, permite encontrar una relación en porcentaje, para el recorrido diario, mensual o anual en el país por parte del transporte, y el aporte que tiene cada una de las áreas, estos datos se exponen en la tabla XXVI de la sección 4.2.3 de resultados.

Teniendo las variables definidas y formulados para encontrar sus tendencias, se procede a estimar los valores de CO₂, bajo los pasos siguientes:

3.4.3.4. Paso 1

Teniendo valores porcentuales, por cantidad de unidades y por actividad de recorrido de las unidades de transporte, es posible obtener las emisiones de CO₂ que produce el transporte público de cada área, incluyendo a la ruta de estudio.

En la tabla XVI se define la simbología para la ecuación que obedece a este planteamiento.

Tabla XVI. Simbología para ecuación 25

Descripción	Símbolo
Emisiones de TCO ₂ e por ruta Ciudad G a Antigua G	E TCO ₂ e AG
Porcentaje de recorrido de ruta Ciudad G a Antigua G	% R AG

Continuación tabla XVI.

Emisiones totales del subsector transporte terrestre [toneladas]	E TCO ₂ e STT
--	--------------------------

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Se calcula la cantidad de toneladas de emisiones de CO₂e provienen de la Ruta de Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala, sin embargo, esta ecuación también aplica para el transporte urbano y extraurbano bajo sus datos correspondientes.

$$E \text{ TCO}_2\text{e AG} = \%R \text{ AG} * (E \text{ TCO}_2\text{e STT}) \quad (20)$$

Los resultados de aplicar esta ecuación se muestran en la columna Ruta Ciudad Guatemala a la Antigua Guatemala. de la tabla XXVII de la sección 4.2.4.de resultados.

3.4.3.5. **Paso 2**

Se identifica el grado de contribución en la reducción de CO₂ al ambiente, por parte del transporte público de la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Según el sistema de transporte de trenes eléctricos propuesto, indicado en la sección 3.4.2.3, se propone un sistema de trenes de 10 unidades, previendo contingencias y mantenimientos para las unidades, distribuidos en viajes y horarios como se muestra en la sección 4.1.3.

Además, dado que cada tren tiene una capacidad de 299 usuarios, es posible que, con su implementación, aumenten los usuarios del transporte.

La propuesta del sistema de 10 trenes permite que el transporte convencional sea desplazado por completo, logrando así que la ruta de ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala esté libre de emisiones de CO₂.

Sin embargo, el valor máximo de emisiones de CO₂e al ambiente se da en el 2032, con 555.43 toneladas, comparándola con el valor de emisiones tendencia de la tabla XIV, se puede apreciar que, la implementación de trenes en la ruta de estudio tiene una contribución en la reducción de emisiones de:

$$\frac{555.43}{55,642,000.00} * 100 \% = 0.0010 \%$$

El resultado obtenido es el impacto directo de la contribución de reemplazar las unidades de transporte público en la ruta de estudio, sin embargo, también existe el impacto indirecto del transporte privado

3.4.3.6. Paso 3

Análisis de las emisiones de CO₂ por parte del transporte privado para la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Resulta interesante analizar el impacto indirecto en la reducción de unidades del transporte privado, que tendría implementar un sistema de trenes en la ruta de estudio, suponiendo que las personas que actualmente se trasladan con un transporte privado, opten por usar el transporte público de trenes eléctricos propuesto, que según la tabla del sistema de trenes eléctricos XXI se

han supuesto con más horarios de viajes en comparación al sistema actual, más plazas de pasajeros, un tiempo de recorrido menor y sin congestionamiento.

Para este estudio, es importante mencionar, que se filtró todas las unidades de transporte terrestre, excepto los que se describen en la clasificación tipo vehículo como autobús, autobús escolar, bus, bus escolar, microbús, microbús escolar, minibús y ómnibus.

Tomando en cuenta que la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala tiene varios puntos intermedios, como destino final, y algunos un poco más allá de la ruta, se buscó tomar una posición conservadora en el trato de datos, y se filtró las unidades de transporte privado del municipio de Antigua Guatemala, únicamente.

Para el cálculo de emisiones, se aplicó el mismo procedimiento de las secciones 3.4.3.2 y 3.4.3.3. Y los resultados para este tratamiento de datos se observan en la tabla XXVIII figura 13 de la sección 4.2.6 de los resultados.

Al igual que el transporte público, el valor máximo de emisiones de CO₂e al ambiente se da en el 2032, con 7,598.50 toneladas, comparándola con el valor de emisiones tendencia de la tabla XIV, se puede apreciar que, la implementación de trenes en la ruta de estudio tiene un impacto directo, con un potencial de contribución en la reducción de emisiones de CO₂ de:

$$\frac{7,598.507}{55,642,000.00} * 100 \% = 0.0136 \%$$

Con este último resultado, se observa que la implementación de trenes eléctricos en la ruta de estudio ha aumentado indirectamente, aunque no es significativo, también se puede indicar que únicamente se contabilizó a las

unidades de transporte de Sacatepéquez, ignorando los municipios intermedios de esta ruta.

En términos de aporte de emisiones, es conveniente analizar los escenarios del transporte extraurbano y urbano.

3.4.3.7. Paso 4

Se exploran más rutas de transporte público, buscando un grado significativo de contribución en reducir las emisiones de CO₂.

Para este análisis, solo se buscará enfocarse en el posible impacto de las reducciones de las emisiones de CO₂, independientemente de la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público.

Una vez más se revisa la contribución en la reducción de emisiones de CO₂ que podría aportar el área del transporte extraurbano, para ello se toman las emisiones del transporte público extraurbano de en toneladas, de la tabla XXVII para el año 2032, en comparación con la tabla XIV, resultando:

$$\frac{75,029.56}{55,642,000.00} * 100 \% = 0.1348 \%$$

Este resultado comparado con el porcentaje de la propuesta no condicionada de la tabla XIV, que busca reducir la tendencia de emisiones en un 11.2 % del total, resulta ser un 1.2 % de aporte para la contribución, que, de su número porcentual, no es significativo para las reducciones de emisiones de CO₂e en el país, por lo que se analiza la comparación para la actividad de transporte urbano, resultando:

$$\frac{5,132.64}{55,642,000.00} * 100 \% = 0.0092 \%$$

Buscando, encontrar un aporte significativo, se realiza la prueba en todo el transporte público, quedando la siguiente operación:

$$\frac{5,132.64 + 75,029.56}{55,642,000.00} * 100 \% = 0.1441 \%$$

Este último valor obtenido, comparado con el 11.2 % de la propuesta no condicionada, de la tabla XIV, resulta ser un aproximado de 1.3 % de aporte para la contribución, que, de su número porcentual, no es significativo para las reducciones de emisiones de CO₂e en el país. Los resultados de estas producciones y posibles aportes en la reducción de emisiones se muestran en las figuras 14 y 15 de la sección 4.2.7 de los resultados.

3.4.3.8. Paso 5

Impacto indirecto en la reducción de emisiones de CO₂ al ambiente, por la implementación de trenes en la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Dado que el parque vehicular fue filtrado únicamente por transporte público, a partir de ello, se deduce que el complemento de las unidades del transporte público para sumar los valores totales del transporte terrestre corresponde al transporte privado, resumiéndolo en la siguiente igualdad.

$$\text{Transporte terrestre} = \text{Transporte público} + \text{Transporte privado} \quad (21)$$

De igual manera, las emisiones de CO₂ por parte del transporte terrestre, es la suma de todas las emisiones del transporte, y según la clasificación del parque vehicular adaptada en esta investigación se obtiene:

$$Emisiones T. terrestre = Emisiones T. público + Emisiones T. privado \quad (22)$$

Los resultados de aplicar las ecuaciones 22 y 23 se obtienen los datos de la tabla XXIX de la sección 4.2.8 de los resultados.

El valor máximo de emisiones de CO₂e al ambiente se da en el 2032, con 17,122,686.28 toneladas, según la tabla XXIX, comparándola con el valor de emisiones tendencia de la tabla XIV, se puede apreciar que tiene una tendencia de producción, que al mismo tiempo es un potencial de contribución a la disminución de CO₂, de:

$$\frac{17,122,686.28}{55,642,000.00} * 100 \% = 30.7730 \%$$

Analizando el año 2020, de la tabla XXIX, se tiene 9,824,690.82 toneladas,

$$\frac{9,824,690.82}{44,890,000.00} * 100 \% = 22.1565 \%$$

Analizando el año 2016, de la tabla XXIX, se tiene 9,151,692.11 toneladas,

$$\frac{9,151,692.11}{41,306,000.00} * 100 \% = 21.8861 \%$$

Los resultados obtenidos de las operaciones del 33 al 35 muestran que el área del transporte privado es el que puede contribuir en altos porcentajes para disminuir las emisiones de CO₂. Por lo que vale la pena concentrar los esfuerzos de reducciones en esta área, buscando estrategias directas e indirectas.

3.4.4. Fase 4: acciones para la matriz energética ante un sistema de trenes eléctricos en el transporte público

En esta sección se analiza el impacto que el sistema de trenes propuesto en la sección 4.1.3 de los resultados, tiene sobre la matriz eléctrica de Guatemala, para proponer acciones directas al plan de energía del MEM.

Se plantean los siguientes pasos para encontrar los resultados que plantea este objetivo.

3.4.4.1. Paso 1

Evaluar la necesidad de incrementar la capacidad de la matriz energética planteada al año 2032, con la implementación de trenes en la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Según los resultados de la sección 3.4.2.6 de la fase 2, la matriz energética del plan de energía al año 2032, es capaz de soportar 491 unidades de trenes eléctricos, y comparado con las 10 unidades, propuestos para el sistema de transporte de la ruta de estudio, reflejado en la sección 4.1.3 de los resultados, claramente se puede observar que no es necesario incrementar la capacidad de la matriz proyectada en el plan nacional de energía 2017-2032.

Esto se demuestra evaluando el número de trenes de cada caso en la ecuación número 18, de la sección 3.4.2.6, bajo la siguiente condición:

Si, $CME (Nt = 491) > CME (Nt = 10)$; no es necesario incrementar la capacidad de la potencia al año 2032, en caso contrario, es necesario incrementar la potencia instalada con fuentes renovables, tomando en cuenta el criterio de inestabilidad de las fuentes renovables ($Prnv = 34.5 \% CI$).

$$CME (Nt = 491) = 491 * 4.8 + 4,387.15$$

$$CME (Nt = 491) = 6,743.92 MW$$

$$CME (Nt = 10) = 10 * 4.8 + 4,387.15$$

$$CME (Nt = 10) = 4,435.12 MW$$

Efectivamente, se cumple la condición $CME (Nt = 491) > CME (Nt = 10)$, por lo que se puede concluir que la matriz energética planteada en el plan de energía del MEM, puede soportar sin ningún problema, al sistema de trenes propuesto en el transporte público para la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Por lo anterior, se determina que no es necesario incrementar la capacidad de la matriz proyectada en el plan nacional de energía 2017-2032, para implementar un sistema de trenes eléctricos en la ruta ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Incluso, se demuestra en la sección 3.4.2.6, que soporta hasta 491 unidades de trenes, sin comprometer la demanda de otros sectores de consumo.

3.4.4.2. Paso 2

Aunque es claro que la capacidad de la matriz energética del plan de energía puede cumplir con la demanda del sistema de trenes propuesto para la ruta de estudio, resulta interesante analizar la energía demandada de la proyección del mismo plan.

Este análisis se hace a partir del resultado de comprar a la matriz energética proyectada al 2032, contra el consumo de energía anual del sistema de trenes propuesto, como se muestra en la tabla XXX de la sección 4.3.2 de resultados.

El sistema de trenes propuesto, de 10 unidades, consumirá 60,480 GWh con sus recorridos, comparada con los 27,030.90 de consumos que proyecta el MEM en su plan de energía para el año 2032, se observa las veces en que supera la demanda total con la siguiente relación:

$$\frac{60,480}{27,039} = 2,23 \text{ veces}$$

Con estos resultados, se puede indicar que, en cuanto a los niveles de consumo de energía, el sistema de trenes propuesto supera por 2.23 veces a los niveles de consumo previstos por el plan de energía del MEM.

3.5. Técnicas de análisis de información

Para llevar a cabo la evaluación de la información, se han utilizado tablas que organizan los datos de forma ordenada, especificando los años recolectados del 2016 al 2020, como años conocidos. Además, se emplearon herramientas de

pronóstico de Microsoft Excel para calcular las funciones tendencia en aquellos años en los que no se contaba con datos disponibles dentro del periodo del estudio. Dependiendo del tipo de variable, se seleccionaron funciones discretas o continuas para el análisis correspondiente.

Para los resultados obtenidos del estudio también se presentan las gráficas con tendencia lineal, en donde se puede apreciar la relación y asociación entre una variable y otra.

La comparación de los resultados, entre una variable y otra se realiza, con herramientas de igualdad y desigualdades, bajo el dominio lógico de cada una de las variables tratadas en este estudio.

Los escenarios de los años de estudio también son presentados en gráficas pie, buscando evidenciar y facilitar el análisis.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección, se exponen los resultados obtenidos, proporcionando datos para ser analizados en el siguiente capítulo.

4.1. Matriz energética nacional ante la integración de trenes eléctricos

Esta matriz se ha obtenido de la suma de potencia renovable, no renovable y energía del 2016.

4.1.1. Matriz energética 2016 - 2032

El resultado obtenido es la matriz energética 2032 de Guatemala, planteada por el Ministerio de Energía y Minas, en el Plan Nacional de Energía.

Tabla XVII. Matriz energética de Guatemala proyectada al 2032

Fuente	MW	Porcentaje	GWh	Participación
Renovable	7,108.08	69 %	17,299.78	64 %
No Renovable	3,195.20	31 %	9,731.12	36 %
TOTAL	10,303.28		27,030.90	

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

4.1.2. Ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala

La cantidad de viajes anuales se obtuvieron con un año calendario de 360 días, contando asuertos y feriados.

Tabla XVIII. Transporte público en ruta de estudio

Empresa	Horario de salida		Cantidad de unidades			Usuarios promedio por viaje =54
	Origen	Destino	Viajes ida	Viajes vuelta	Total viajes /año	
Primorosa	05:30	10:00	3	3	2,160	
Primorosa	06:00	11:00	3	3	2,160	
Orellana	08:10	12:10	7	7	5,040	
Orellana	08:20	12:20	7	7	5,040	
Orellana	08:30	12:30	7	7	5,040	
Orellana	14:40	17:00	7	7	5,040	
Orellana	14:50	17:10	7	7	5,040	
Orellana	15:00	17:20	7	7	5,040	
Primorosa	15:15	18:00	3	3	2,160	
Primorosa	16:00	18:15	3	3	2,160	Cantidad de usuarios
Total de viajes anuales:				38,880	2,099,520	

Fuente: elaboración propia, con datos de Dirección General de Transportes (2022). *Resolución No UIP-DGT-257-2022.*

4.1.3. Sistema de trenes eléctricos para el transporte público

Se propone un sistema de trenes de 10 unidades, previendo contingencias y mantenimientos para las unidades, distribuidos en viajes y horarios como se muestra en la tabla XIX.

Tabla XIX. Propuesta de distribución de horarios de trenes eléctricos en ruta de Antigua Guatemala a Ciudad de Guatemala

Horario		Cantidad de unidades			Usuarios promedio por viaje = 299
Ciudad de Antigua origen	Guatemala destino	Viajes ida	Viajes vuelta	Total viajes /año	
05:00	05:00	1	1	720	
05:30	05:30	1	1	720	
06:00	06:00	1	1	720	
06:30	06:30	1	1	720	
07:00	07:00	1	1	720	
07:30	07:30	1	1	720	
08:00	08:00	1	1	720	
08:30	08:30	1	1	720	
09:00	09:00	1	1	720	
09:30	09:30	1	1	720	
10:00	10:00	1	1	720	
10:30	10:30	1	1	720	
11:00	11:00	1	1	720	
11:30	11:30	1	1	720	
12:00	12:00	1	1	720	
12:30	12:30	1	1	720	
13:00	13:00	1	1	720	
13:30	13:30	1	1	720	
14:00	14:00	1	1	720	
14:30	14:30	1	1	720	
15:00	15:00	1	1	720	
15:30	15:30	1	1	720	
16:00	16:00	1	1	720	
16:30	16:30	1	1	720	
17:00	17:00	1	1	720	
17:30	17:30	1	1	720	
18:00	18:00	1	1	720	
18:30	18:30	1	1	720	
19:00	19:00	1	1	720	
19:30	19:30	1	1	720	
20:00	20:00	1	1	720	
20:30	20:30	1	1	720	
21:00	21:00	1	1	720	

Continuación tabla XIX.

21:30	21:30	1	1	720	
22:00	22:00	1	1	720	Cantidad de usuarios
Total, de viajes anuales:			25,200	7,534,800	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.4. Energía consumida por sistemas de trenes eléctricos

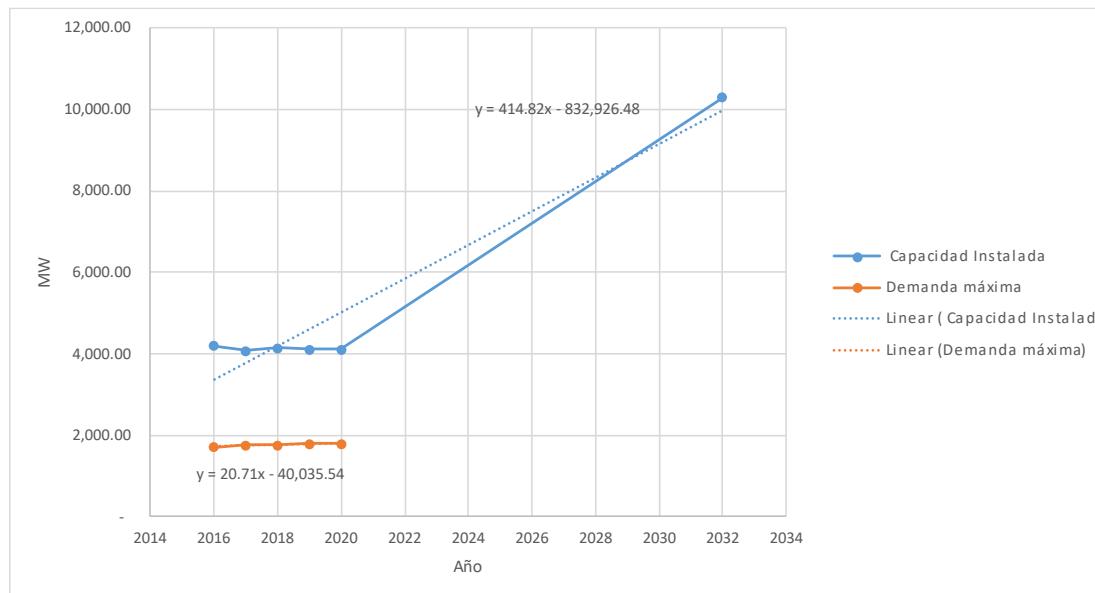
Con la cantidad de viajes anuales, el tiempo del tren en curso y la potencia nominal de cada unidad, se ha obtenido la cantidad de energía anual.

Tabla XX. Consumo de energía anual del sistema de trenes propuesto

Consumo de energía de trenes			
Cantidad de viajes anuales	Tiempo estimado de viaje en horas	Potencia nominal por tren kW	Energía en GWh
25,200	0.5	4,800.00	60,480.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 5. Proyección de capacidad de matriz energética 2016-2032



Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

4.1.5. Tendencia de cargas al año 2032

La tendencia de cargas se obtuvo con los años 2016 al 2020 como años base, y los valores proyectados de capacidad instalada al 2032, los resultados se muestran en la tabla XXI y figura 5.

Tabla XXI. Capacidad total instalada de las centrales generadoras de Guatemala del año 2016 al 2020

Año	Potencia [MW]		% máximo demandado de la capacidad instalada
	Capacidad instalada	Demanda máxima	
2016	4,201.00	1,701.60	40.50 %
2017	4,068.80	1,749.50	43.00 %
2018	4,151.60	1,762.50	42.45 %
2019	4,108.60	1,785.40	43.46 %
2020	4,109.50	1,787.20	43.49 %
2021	5,424.74	2,309.86	42.58 %
2022	5,839.56	2,486.49	42.58 %
2023	6,254.38	2,663.12	42.58 %
2024	6,669.20	2,839.76	42.58 %
2025	7,084.02	3,016.39	42.58 %
2026	7,498.84	3,193.02	42.58 %
2027	7,913.66	3,369.65	42.58 %
2028	8,328.48	3,546.28	42.58 %
2029	8,743.30	3,722.91	42.58 %
2030	9,158.12	3,899.54	42.58 %
2031	9,572.94	4,076.17	42.58 %
2032	10,303.28	4,387.15	42.58 %

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

4.1.6. Potencia demandada del sistema de trenes

La potencia demandada del sistema de trenes en MW fue obtenida con la adición de la demanda máxima por año, como se muestra en la tabla XXII.

Tabla XXII. Capacidad instalada de las centrales generadoras de antes a la implementación de un sistema de trenes eléctricos

Año	Potencia nominal por tren		Potencia total del sistema de trenes MW
	kW	Cantidad de trenes	
	4,800.00	10	48
Potencia [MW]		Porcentaje máximo demandado de la capacidad	
Capacidad instalada	Demanda máxima	instalada	
2016	4,201.00	1,749.60	41.65 %
2017	4,068.80	1,797.50	44.18 %
2018	4,151.60	1,810.50	43.61 %
2019	4,108.60	1,833.40	44.62 %
2020	4,109.50	1,835.20	44.66 %
2021	5,424.74	2,357.86	43.46 %
2022	5,839.56	2,534.49	43.40 %
2023	6,254.38	2,711.12	43.35 %
2024	6,669.20	2,887.76	43.30 %
2025	7,084.02	3,064.39	43.26 %
2026	7,498.84	3,241.02	43.22 %
2027	7,913.66	3,417.65	43.19 %
2028	8,328.48	3,594.28	43.16 %
2029	8,743.30	3,770.91	43.13 %
2030	9,158.12	3,947.54	43.10 %
2031	9,572.94	4,124.17	43.08 %
2032	10,303.28	4,435.15	43.05 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.7. Capacidad de la matriz energética nacional

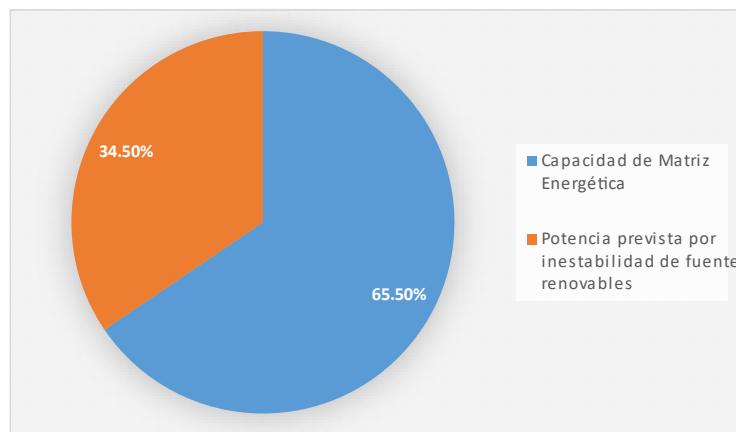
La figura 6 muestra tres funciones, una recta en color azul, que representa la potencia de los trenes en función de las unidades de trenes. La línea naranja muestra la capacidad máxima de la matriz energética tomando en cuenta la inestabilidad de las fuentes renovables para la generación de energía, mientras que la línea gris muestra la capacidad total instalada.

Tabla XXIII. Capacidad máxima de matriz energética

Capacidad Instalada de la matriz 2032 en [MW]	
Capacidad de matriz energética	6,748.65
Potencia prevista por inestabilidad de fuentes renovables	3,554.63
TOTAL	10,303.28

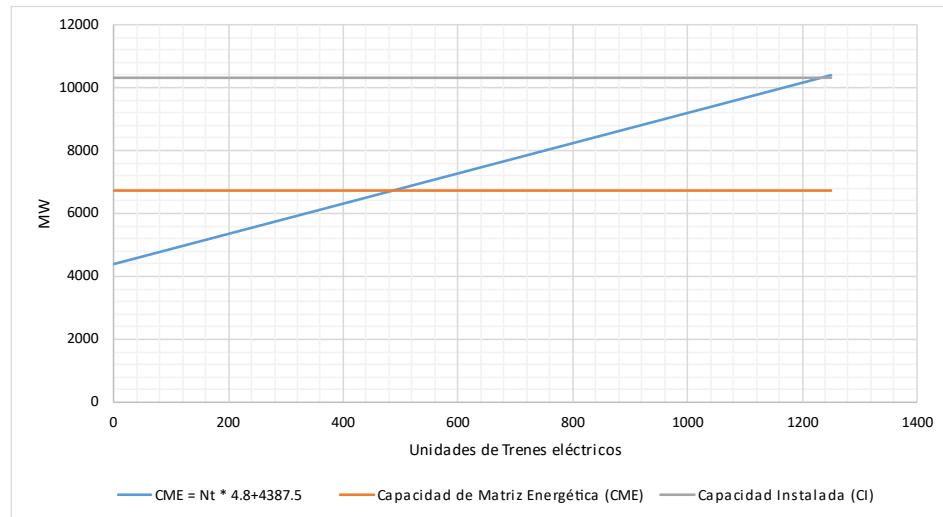
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 6. Capacidad Instalada de la matriz energética 2032



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 7. Capacidad máxima aprovechable vs demanda de sistema de trenes eléctricos



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Unidades de transporte soportadas por la matriz energética sin comprometer otros sectores de consumo:

$$Nt = \frac{(10,303.28 * (100 \% - 34.5 \%)) - 4387.15 \text{ MW}}{4.8 \text{ MW}} = 491 \text{ unidades}$$

4.2. Reducción de emisiones de CO₂ por la implementación de trenes eléctricos en el transporte público

Los resultados de variables con datos, y resultados del proceso paso por paso para esta sección, se presentan a continuación.

4.2.1. Tendencia del parque vehicular terrestre en Guatemala

Manteniendo 10 unidades de transporte para los años del 2016 al 2022, y aplicando la razón de cambio indicada en la sección 3.4.2.2 para los años posteriores al 2022 se obtienen como resultado los datos de la tabla XXIV y figuras 8 y 9.

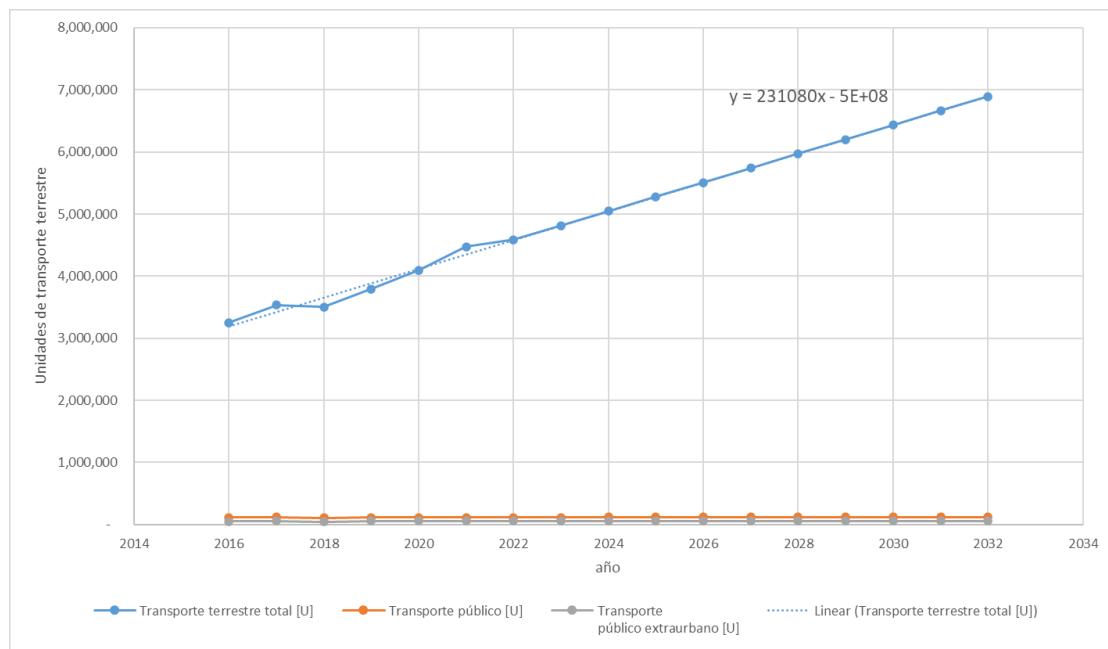
Tabla XXIV. Datos y tendencia de unidades de transporte terrestre, transporte público de Guatemala

Año	Transporte terrestre	Transporte público	Transporte urbano	Transporte público urbano [%]	Transporte extraurbano	Transporte público extraurbano [%]	Tasa de cambio entre años de transporte extraurbano	Transporte público ruta Ciudad G. a Antigua G. [U]	Transporte público ruta Ciudad G. a Antigua G. [%]
	total [U]	público [U]	urbano [U]	urbano [%]	[U]	[%]			
2016	3,249,670	113,439	58,731	1.81 %	54,708	1.68 %		10	0.02 %
2017	3,536,285	118,699	61,992	1.75 %	56,707	1.60 %	3.53 %	10	0.02 %
2018	3,504,305	110,844	57,574	1.64 %	53,270	1.52 %	-6.45 %	10	0.02 %
2019	3,795,206	115,097	59,864	1.58 %	55,233	1.46 %	3.55 %	10	0.02 %
2020	4,097,181	116,631	60,770	1.48 %	55,861	1.36 %	1.12 %	10	0.02 %
2021	4,472,515	117,421	60,642	1.36 %	56,779	1.27 %	1.62 %	10	0.02 %
2022	4,584,642	117,151	60,747	1.33 %	56,404	1.23 %	-0.66 %	11	0.02 %
2023	4,815,722	117,664	60,980	1.27 %	56,684	1.18 %	0.49 %	12	0.02 %
2024	5,046,803	118,177	61,214	1.21 %	56,963	1.13 %	0.49 %	13	0.02 %
2025	5,277,883	118,690	61,448	1.16 %	57,243	1.08 %	0.49 %	14	0.02 %
2026	5,508,963	119,204	61,681	1.12 %	57,522	1.04 %	0.49 %	15	0.02 %
2027	5,740,044	119,717	61,915	1.08 %	57,801	1.01 %	0.48 %	16	0.03 %
2028	5,971,124	120,230	62,149	1.04 %	58,081	0.97 %	0.48 %	17	0.03 %
2029	6,202,205	120,743	62,383	1.01 %	58,360	0.94 %	0.48 %	18	0.03 %
2030	6,433,285	121,256	62,616	0.97 %	58,640	0.91 %	0.48 %	19	0.03 %
2031	6,664,365	121,769	62,850	0.94 %	58,919	0.88 %	0.47 %	20	0.03 %
2032	6,895,446	122,282	63,084	0.91 %	59,199	0.86 %	0.47 %	21	0.03 %

Fuente: elaboración propia, con datos de Superintendencia de Administración Tributaria (2022).

Análisis estadístico del parque vehicular.

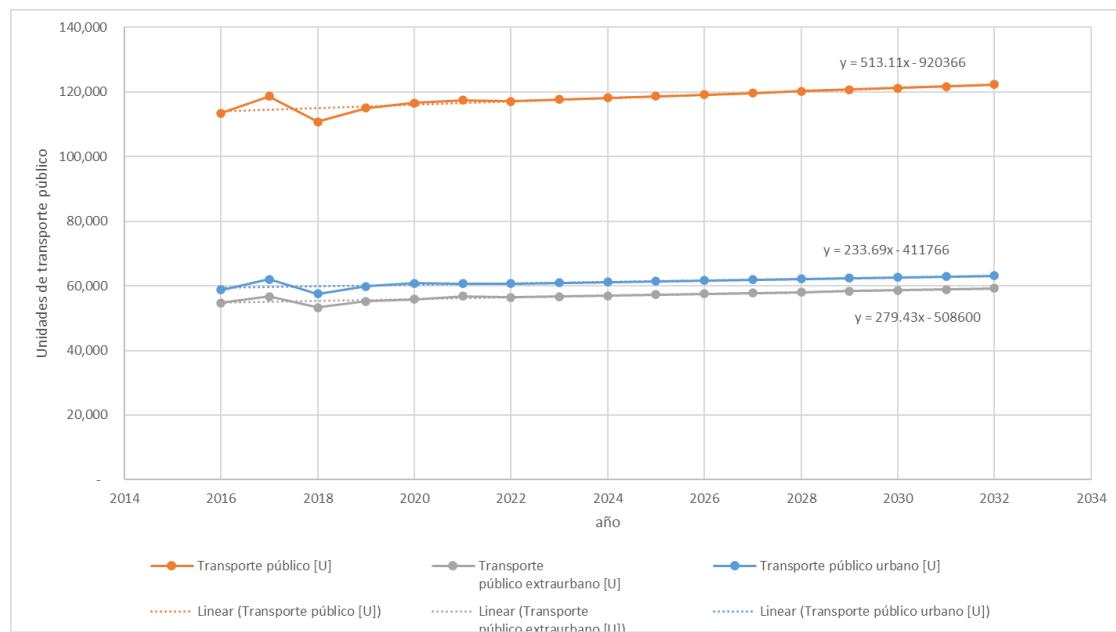
Figura 8. Tendencia anual de la cantidad de unidades de transporte terrestre en Guatemala



Fuente: elaboración propia, con datos de Superintendencia de Administración Tributaria (2022).

Análisis estadístico del parque vehicular.

Figura 9. Tendencia anual de la cantidad de unidades de transporte público en Guatemala



Fuente: elaboración propia, con datos de Superintendencia de Administración Tributaria (2022).

Análisis estadístico del parque vehicular.

4.2.2. Emisiones de CO₂ en el sector energía de Guatemala

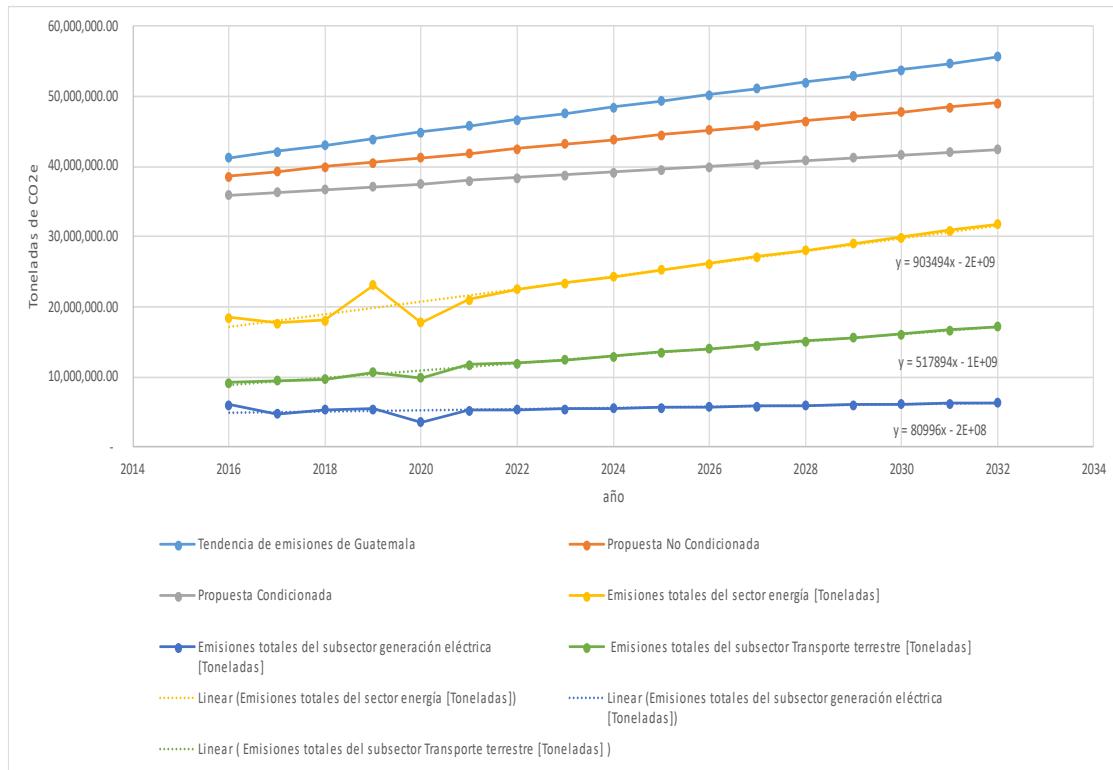
Los datos indicados en la tabla XXV y la figura 10 muestran la cantidad de emisiones de CO₂ en el subsector transporte terrestre, a partir de las emisiones del sector energía e identificando las emisiones que produce el subsector generación eléctrica.

Tabla XXV. Emisiones de CO₂ del sector energía y sus subsectores transporte y generación eléctrica de Guatemala

Año	Emisiones totales del sector energía [Toneladas]	Porcentaje de emisiones del sector energía en Guatemala [%]	Emisiones totales del subsector generación eléctrica [Toneladas]	Emisiones totales del subsector	[%] del sector energía por el subsector transporte terrestre	[%] del sector energía por el subsector generación eléctrica
			Transporte terrestre [Toneladas]			
2016	18,460,000.00	44.69 %	6,078,878.00	9,230,000.0	50.00 %	32.93 %
2017	17,690,736.96	41.92 %	4,757,039.17	9,530,000.0	53.87 %	26.89 %
2018	18,080,357.14	41.95 %	5,348,169.64	9,720,000.0	53.76 %	29.58 %
2019	23,136,579.06	52.59 %	5,425,527.79	10,740,000.0	46.42 %	23.45 %
2020	17,837,837.84	39.74 %	3,594,324.32	9,900,000.0	55.50 %	20.15 %
2021	21,039,471.33	45.95 %	5,233,820.36	11,780,000.0	55.99 %	21.31 %
2022	22,496,991.92	48.19 %	5,336,274.68	11,951,333.3	53.12 %	23.72 %
2023	23,429,263.50	49.24 %	5,438,729.00	12,476,484.8	53.25 %	23.21 %
2024	24,361,535.08	50.26 %	5,541,183.32	13,001,636.4	53.37 %	22.75 %
2025	25,293,806.66	51.23 %	5,643,637.64	13,526,787.9	53.48 %	22.31 %
2026	26,226,078.24	52.17 %	5,746,091.96	14,051,939.4	53.58 %	21.91 %
2027	27,158,349.81	53.08 %	5,848,546.27	14,577,090.9	53.67 %	21.53 %
2028	28,090,621.39	53.96 %	5,951,000.59	15,102,242.4	53.76 %	21.19 %
2029	29,022,892.97	54.81 %	6,053,454.91	15,627,393.9	53.85 %	20.86 %
2030	29,955,164.55	55.63 %	6,155,909.23	16,152,545.5	53.92 %	20.55 %
2031	30,887,436.13	56.42 %	6,258,363.55	16,677,697.0	54.00 %	20.26 %
2032	31,819,707.71	57.19 %	6,360,817.87	17,202,848.5	54.06 %	19.99 %

Fuente: elaboración propia, con datos de Ministerio de Energía y Minas (2022). *Revistas de balance energético anuales*.

Figura 10. Tendencia de emisiones CO₂e de NDC y tendencia de sector energía y subsectores transporte y generación eléctrica



Fuente: elaboración propia, con datos de Ministerio de Energía y Minas (2022). *Revistas de balance energético anuales*.

4.2.3. Actividad en recorrido por parte del transporte terrestre

Los datos de la tabla XXVI, muestran el resultado del recorrido diario en km del transporte terrestre, para el área urbana, extraurbana y la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Tabla XXVI. Recorrido diario por parte del transporte terrestre en área urbana, extraurbana y ruta de estudio

Año			Ruta Ciudad			Ruta Ciudad	
	Urbano	Extraurbano	G. a Antigua		Extraurbano	G. a Antigua	
	[km]	[km]	G. [km]	Urbano [%]	[%]	G. [%]	
2016	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2017	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2018	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2019	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2020	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2021	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2022	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2023	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2024	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2025	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2026	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2027	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2028	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2029	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2030	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2031	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	
2032	16.14	251.42	48	0.060322918	0.939677082	0.179399013	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.4. Emisiones de CO₂ producidas por el transporte público de Guatemala

La cantidad de toneladas de emisiones de CO₂e provienen de la ruta de Antigua Guatemala a ciudad de Guatemala, como se muestra en la tabla XXVII.

Tabla XXVII. Emisiones de CO₂e por el transporte público de Guatemala

Año	Urbano [%]	Extraurbano [%]	Ruta Ciudad G. a Antigua G. [%]	Urbano [Toneladas]	Extraurbano [Toneladas]	Ruta Ciudad G. a Antigua G. [Toneladas]
2016	0.0545 %	0.7910 %	0.0015 %	5,031.32	73,006.57	140.97
2017	0.0570 %	0.8117 %	0.0016 %	5,428.88	77,358.48	148.57
2018	0.0533 %	0.7679 %	0.0017 %	5,178.84	74,642.29	162.82
2019	0.0442 %	0.6348 %	0.0014 %	4,743.75	68,179.11	149.40
2020	0.0497 %	0.7110 %	0.0016 %	4,916.03	70,393.14	162.20
2021	0.0458 %	0.6679 %	0.0017 %	5,394.61	78,681.08	195.12
2022	0.0425 %	0.6142 %	0.0017 %	5,074.67	73,399.65	206.25
2023	0.0407 %	0.5890 %	0.0019 %	5,075.01	73,485.51	234.55
2024	0.0390 %	0.5660 %	0.0020 %	5,077.02	73,594.95	264.36
2025	0.0376 %	0.5450 %	0.0022 %	5,080.47	73,724.79	295.68
2026	0.0362 %	0.5257 %	0.0023 %	5,085.18	73,872.41	328.47
2027	0.0349 %	0.5079 %	0.0025 %	5,090.99	74,035.62	362.73
2028	0.0338 %	0.4914 %	0.0026 %	5,097.78	74,212.56	398.43
2029	0.0327 %	0.4761 %	0.0028 %	5,105.42	74,401.68	435.57
2030	0.0317 %	0.4619 %	0.0029 %	5,113.83	74,601.62	474.13
2031	0.0307 %	0.4486 %	0.0031 %	5,122.93	74,811.25	514.09
2032	0.0298 %	0.4361 %	0.0032 %	5,132.64	75,029.56	555.43

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.5. Contribución de la ruta de estudio en mitigar las emisiones de CO₂

La propuesta del sistema de 10 trenes permite que el transporte convencional sea desplazado por completo, logrando así que la ruta de ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala esté libre de emisiones de CO₂, dando como un impacto directo de:

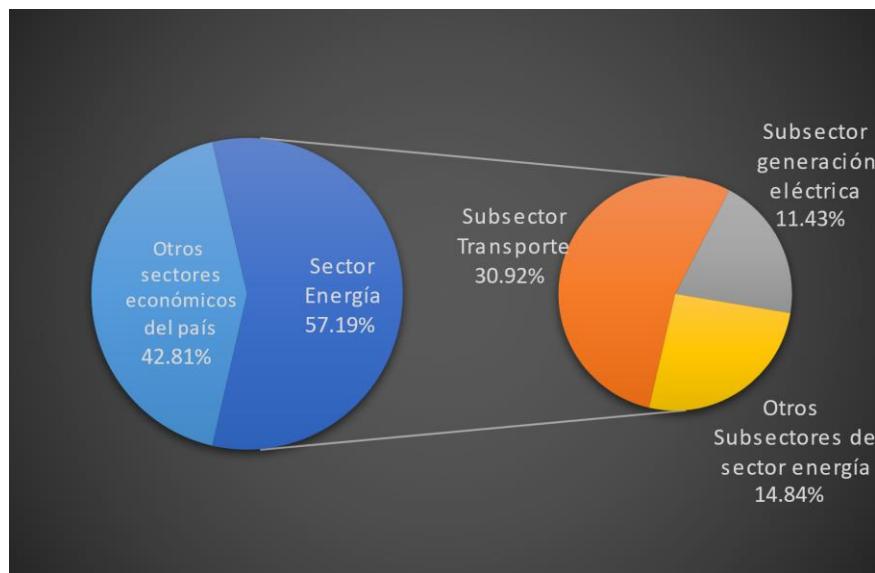
$$\frac{555.43}{55,642,000.00} * 100 \% = 0.0010 \%$$

El resultado obtenido es el impacto directo de la contribución de reemplazar las unidades de transporte público en la ruta de estudio, sin embargo, también existe el impacto indirecto del transporte privado, por esa razón es importante notar las comparaciones de las emisiones se observan en las figuras 11 y 12.

4.2.6. Análisis de las emisiones de CO₂ por parte del transporte privado en la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala

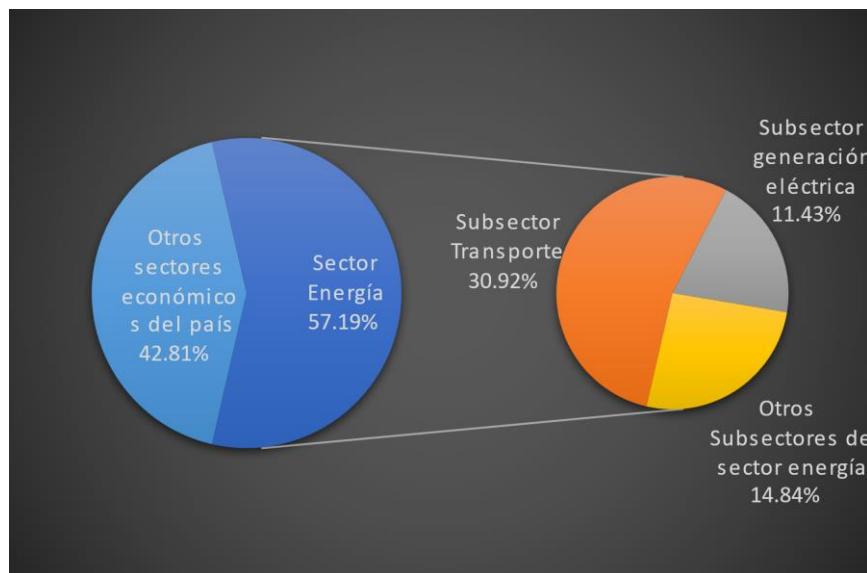
Con los resultados indicados en la tabla XXVIII, se observa que la implementación de trenes eléctricos en la ruta de estudio ha aumentado indirectamente.

Figura 11. Emisiones de Guatemala 2032 sustituyendo al transporte público actual por trenes eléctricos en la ruta de estudio



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 12. Emisiones de CO₂ de Guatemala estimados para el año 2032



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXVIII. Emisiones de CO₂e por el transporte privado en la ruta de estudio Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala

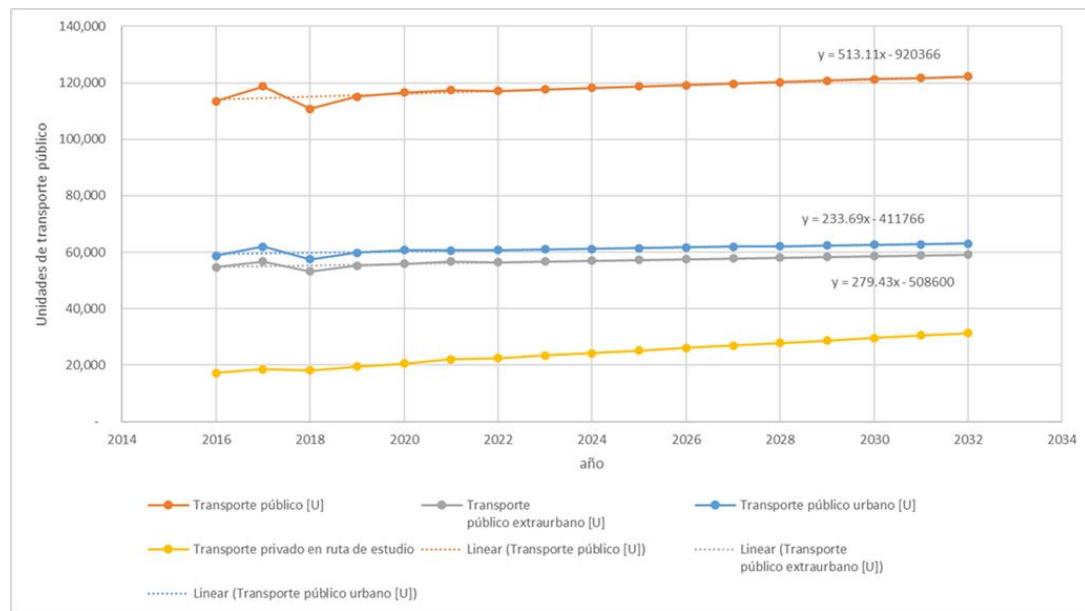
Año	Emisiones totales del subsector Transporte terrestre [Toneladas]	[%] del sector energía por el subsector transporte terrestre		Transporte terrestre total [U]	Ciudad G. a Antigua G. G. [U]	Transporte privado ruta Ciudad G. a Antigua G. G. [%]	Transporte privado ruta Ciudad d G. a Antigua G. G. [%]	Transporte privado ruta Ciudad d G. a Antigua G. G. [Toneladas]
		terrestre	total [U]					
2016	9,230,000.0	50.00 %	3,249,670	17,266.00	0.53 %	0.0477 %	4,398.901	
2017	9,530,000.0	53.87 %	3,536,285	18,552.00	0.52 %	0.0507 %	4,831.738	
2018	9,720,000.0	53.76 %	3,504,305	18,211.00	0.52 %	0.0501 %	4,871.666	
2019	10,740,000.0	46.42 %	3,795,206	19,500.00	0.51 %	0.0428 %	4,595.457	
2020	9,900,000.0	55.50 %	4,097,181	20,553.00	0.50 %	0.0499 %	4,944.681	
2021	11,780,000.0	55.99 %	4,472,515	22,054.00	0.49 %	0.0495 %	5,834.604	
2022	11,951,333.3	53.12 %	4,584,642	22,479.20	0.49 %	0.0467 %	5,584.750	
2023	12,476,484.8	53.25 %	4,815,722	23,371.54	0.49 %	0.0464 %	5,784.580	

Continuación tabla XXVIII.

2024	13,001,636.4	53.37 %	5,046,803	24,263.89	0.48 %	0.0460 %	5,984.880
2025	13,526,787.9	53.48 %	5,277,883	25,156.23	0.48 %	0.0457 %	6,185.588
2026	14,051,939.4	53.58 %	5,508,963	26,048.57	0.47 %	0.0455 %	6,386.652
2027	14,577,090.9	53.67 %	5,740,044	26,940.91	0.47 %	0.0452 %	6,588.029
2028	15,102,242.4	53.76 %	5,971,124	27,833.26	0.47 %	0.0450 %	6,789.683
2029	15,627,393.9	53.85 %	6,202,205	28,725.60	0.46 %	0.0447 %	6,991.583
2030	16,152,545.5	53.92 %	6,433,285	29,617.94	0.46 %	0.0445 %	7,193.701
2031	16,677,697.0	54.00 %	6,664,365	30,510.29	0.46 %	0.0443 %	7,396.016
2032	17,202,848.5	54.06 %	6,895,446	31,402.63	0.46 %	0.0442 %	7,598.507

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 13. Tendencia anual de la cantidad de unidades de transporte público en Guatemala y el privado en la ruta de estudio



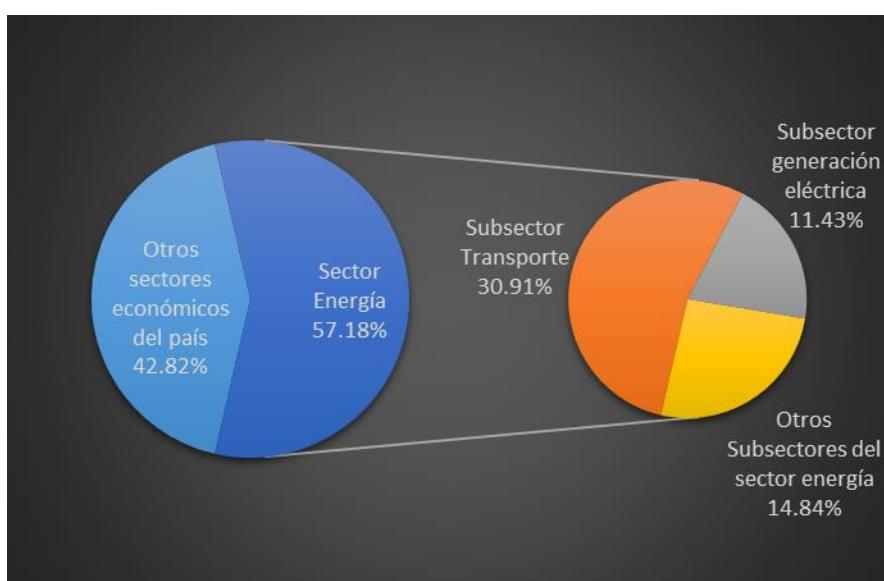
Fuente: elaboración propia, con datos de Superintendencia de Administración Tributaria (2022). *Análisis estadístico del parque vehicular.*

4.2.7. Análisis de las emisiones de CO₂ por parte del transporte público en Guatemala

Se han explorado más rutas de transporte público, con el objetivo de encontrar un grado significativo de contribución en reducir las emisiones de CO₂, para esta sección el enfoque estuvo en el posible impacto de las reducciones de las emisiones de CO₂, Independientemente de la cantidad de trenes eléctricos que deben integrarse al transporte público, los resultados de estos producciones y posibles aportes en la reducción de emisiones se muestran en las figuras 14 y 15.

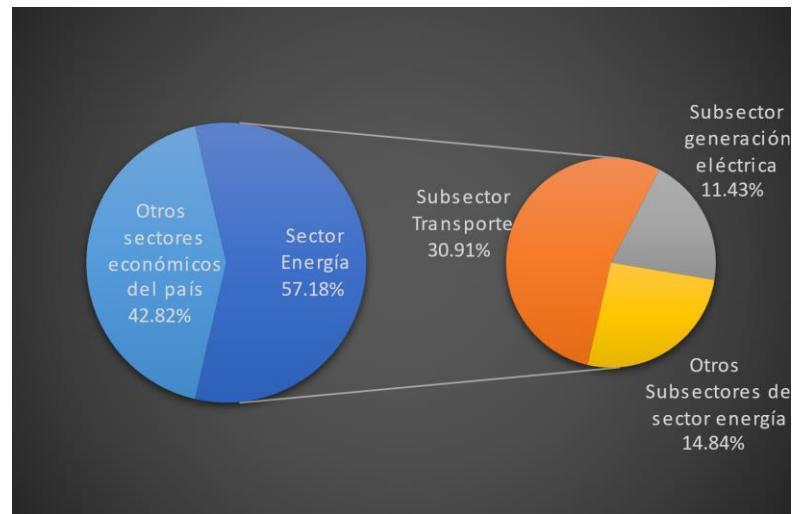
Figura 14. Implementación de trenes eléctricos en la ruta de estudio y su impacto indirecto en la reducción de emisiones de CO₂ en

2032



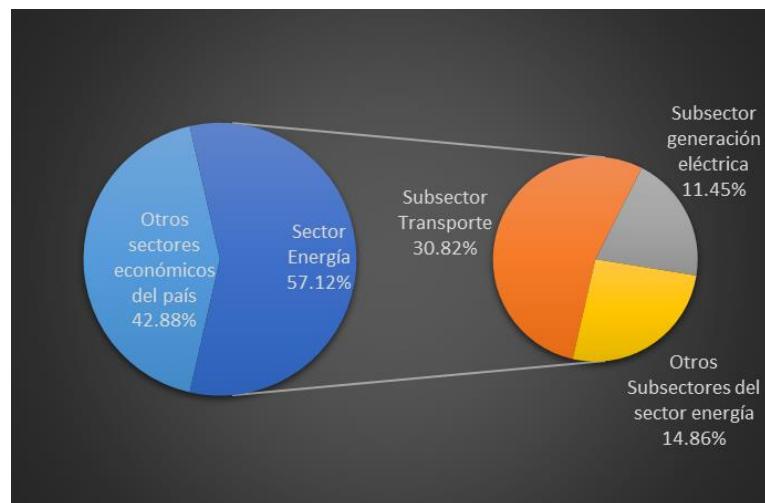
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 15. Análisis del grado de contribución en la reducción de emisiones de CO₂ por el transporte público urbano en 2032



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 16. Análisis del grado de contribución en la reducción de emisiones de CO₂ por el transporte público total en 2032



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.8. Análisis de las emisiones de CO₂ por parte del transporte privado en Guatemala

El valor máximo de emisiones de CO₂e al ambiente se da en el 2032, a lo que corresponde un potencial máximo de contribución en la reducción de emisiones de:

$$\frac{17,122,686.28}{55,642,000.00} * 100 \% = 30.7730 \%$$

Analizando el año 2020, se observa un potencial máximo para la contribución en la reducción de emisiones de:

$$\frac{9,824,690.82}{44,890,000.00} * 100 \% = 22.1565 \%$$

Analizando el año 2016, se observa un potencial máximo para la contribución en la reducción de emisiones de:

$$\frac{9,151,692.11}{41,306,000.00} * 100 \% = 21.8861 \%$$

Tabla XXIX. Emisiones de CO₂e por el transporte privado en Guatemala

Año	Tendencia de emisiones de Guatemala		Propuesta No Condicionada	Propuesta Condicionada	Emisiones totales del subsector	Emisiones totales de transporte	Emisiones totales de transporte público	Emisiones totales de transporte público	Emisiones totales de transporte Privado
					[Toneladas]	[Toneladas]	[Toneladas]	[Toneladas]	
2016	41,306,000.00	38,648,400.00	35,942,400.00		9,230,000.0	5,031.32	73,006.57	9,151,962.11	
2017	42,202,000.00	39,302,800.00	36,350,800.00		9,530,000.0	5,428.88	77,358.48	9,447,212.64	
2018	43,098,000.00	39,957,200.00	36,759,200.00		9,720,000.0	5,178.84	74,642.29	9,640,178.87	

Continuación tabla XXIX.

2019	43,994,000.00	40,611,600.00	37,167,600.00	10,740,000.0	4,743.75	68,179.11	10,667,077.14
2020	44,890,000.00	41,266,000.00	37,576,000.00	9,900,000.0	4,916.03	70,393.14	9,824,690.82
2021	45,786,000.00	41,920,400.00	37,984,400.00	11,780,000.0	5,394.61	78,681.08	11,695,924.31
2022	46,682,000.00	42,574,800.00	38,392,800.00	11,951,333.3	5,074.67	73,399.65	11,872,859.01
2023	47,578,000.00	43,229,200.00	38,801,200.00	12,476,484.8	5,075.01	73,485.51	12,397,924.32
2024	48,474,000.00	43,883,600.00	39,209,600.00	13,001,636.4	5,077.02	73,594.95	12,922,964.39
2025	49,370,000.00	44,538,000.00	39,618,000.00	13,526,787.9	5,080.47	73,724.79	13,447,982.62
2026	50,266,000.00	45,192,400.00	40,026,400.00	14,051,939.4	5,085.18	73,872.41	13,972,981.80
2027	51,162,000.00	45,846,800.00	40,434,800.00	14,577,090.9	5,090.99	74,035.62	14,497,964.30
2028	52,058,000.00	46,501,200.00	40,843,200.00	15,102,242.4	5,097.78	74,212.56	15,022,932.08
2029	52,954,000.00	47,155,600.00	41,251,600.00	15,627,393.9	5,105.42	74,401.68	15,547,886.84
2030	53,850,000.00	47,810,000.00	41,660,000.00	16,152,545.5	5,113.83	74,601.62	16,072,830.00
2031	54,746,000.00	48,464,400.00	42,068,400.00	16,677,697.0	5,122.93	74,811.25	16,597,762.79
2032	55,642,000.00	49,118,800.00	42,476,800.00	17,202,848.5	5,132.64	75,029.56	17,122,686.28

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.3. Identificación de acciones en la matriz energética ante el desafío de soportar un sistema de trenes en el transporte público, en la Ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala

En esta sección se analiza el impacto que tiene el sistema de trenes propuesto en el transporte público para la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, sobre la matriz eléctrica de Guatemala, para proponer acciones directas al plan de energía del MEM.

4.3.1. Necesidad de incrementar la capacidad de la matriz energética planteada al año 2032, por la implementación de trenes en la ruta de estudio.

La evaluación se demuestra evaluando la siguiente condición:

Si, $CME (Nt = 491) > CME (Nt = 10)$; no es necesario incrementar la capacidad de la potencia al año 2032, en caso contrario, es necesario incrementar la potencia instalada con fuentes renovables, tomando en cuenta el criterio de inestabilidad de las fuentes renovables ($Prnv = 34.5\% CI$).

$$CME (Nt = 491) = 491 * 4.8 + 4,387.15$$

$$CME (Nt = 491) = 6,743.92 MW$$

$$CME (Nt = 10) = 10 * 4.8 + 4,387.15$$

$$CME (Nt = 10) = 4,435.12 MW$$

Efectivamente, se cumple la condición $CME (Nt = 491) > CME (Nt = 10)$, por lo que se puede concluir que la matriz energética planteada en el plan de energía del MEM, puede soportar sin ningún problema, al sistema de trenes propuesto en el transporte público para la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

Por lo anterior, se determina que no es necesario incrementar la capacidad de la matriz proyectada en el plan nacional de energía 2017-2032, para implementar un sistema de trenes eléctricos en la ruta ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala.

4.3.2. Análisis del plan de energía del MEM, por los consumos del sistema de trenes propuesto en la ruta de estudio

El resultado de comprar a la matriz energética proyectada al 2032, contra el consumo de energía anual del sistema de trenes propuesto, se muestra en la tabla XXX.

El sistema de trenes propuesto, de 10 unidades, consumirá 60,480 GWh con sus recorridos, comparada con los 27,030.90 de consumos que proyecta el MEM en su plan de energía para el año 2032, se observa las veces en que supera la demanda total con la siguiente relación:

$$\frac{60,480}{27,039} = 2,23 \text{ veces}$$

Con estos resultados, se puede indicar los siguiente:

En cuanto a los niveles de consumo de energía, el sistema de trenes propuesto supera por 2.23 veces a los niveles de consumo previstos por el plan de energía del MEM.

Tabla XXX. Matriz Energética proyectada al 2032 contra el consumo de energía anual del sistema de trenes propuesto

Consumo de energía de trenes			
Cantidad de viajes anuales	Tiempo estimado de viaje en horas	Potencia nominal por sistema de trenes MW (10 trenes de 4.8MW c/u)	Energía en GWh
25,200	0.50	4,800.00	60,480.00

Continuación tabla XXX.

Matriz energética proyectada al 2032				
Fuente	MW	Porcentaje	GWh	Participación
Renovable	7,108.08	69 %	17,299.78	64 %
No Renovable	3,195.20	31 %	9,731.12	36 %
TOTAL	10,303.28		27,030.90	

Fuente: elaboración propia, con datos de Comisión Económica para América Latina (2021).

Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA).

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se realiza el análisis de los resultados presentados en el capítulo 4 de este estudio, e indican las generalidades y premisas acordadas para el desarrollo de este estudio.

5.1. Resultado de la matriz energética nacional ante la integración de trenes eléctricos

En las secciones del 4.1.1 al 4.1.3 de los resultados, se aprecian las variables ordenadas y proyectadas al año 2032, para este análisis.

En la sección 4.1.1 de los resultados presentados, se define el escenario de la matriz energética en el año 2032, según el plan de energía, se ordena y se clasifica, para ser comparada con otras variables.

En la sección 4.1.2 de los resultados presentados, se define la ruta de estudio, ordenada y clasificada para ser comparada con el sistema de transporte de trenes eléctricos.

En la sección 4.1.3 se define el sistema de trenes eléctricos para el transporte público, en la ruta de estudio, bajo las siguientes premisas:

- Para la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, se propone la distribución mostrada en la tabla XIX, y se conforma de 10 unidades, con viajes de ida y vuelta en cada media hora, desde las 5:00 hasta las 22:00 horas.

- Se propone un sistema de trenes de 10 unidades, previendo contingencias y mantenimientos para las unidades, distribuidos en viajes y horarios como se muestra en la tabla XIX en la sección 4.1.3 de resultados

En la sección 4.1.4 se define la energía y potencia demandada por el sistema de trenes eléctricos propuesto, para la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, se presenta y resume en la tabla XXXI.

**Tabla XXXI. Parámetros de sistema de trenes propuesto para la ruta
Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala**

Potencia nominal por tren		Potencia total del sistema de trenes MW	
kW	Cantidad de trenes	trenes MW	
4,800.00	10	48.00	
Cantidad de viajes anuales	Tiempo estimado por viaje en horas	Potencia nominal por tren [kW]	Energía anual consumida [GWh]
25,200	0.5	4,800.00	60,480.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para llegar a estos resultados, se consideraron las siguientes premisas:

- Se despreció la carga de los servicios auxiliares, para aires acondicionados, iluminación y distribución de energía por cada unidad de transporte.
- Se despreció la carga y consumo de sitios de espera del transporte.
- Se despreció la carga de arranque y cambios de velocidad en el trayecto de los trenes.

- No se tomó en cuenta la energía regenerada por el freno eléctrico.
- Se tomó la potencia nominal, como potencia constante durante todo el viaje de cada unidad.

Según la sección 4.1.5, para la matriz energética se graficó la información recolectada de la potencia instalada de los años 2016 al 2020, y el año 2032 como meta, y de las gráficas se generó una función tendencia de crecimiento, y con esta misma función se calcularon los datos proyectados para los años futuros hasta el año meta, este se prepara para adicionar la potencia que demanda el sistema de trenes eléctricos propuesto en la sección 4.1.4.

Según los resultados presentados en la sección 4.1.6, se toma en cuenta la incorporación de un sistema de 10 unidades de trenes eléctricos para la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, representando 48 MW de potencia demandada al sistema de generación eléctrica.

A diferencia de los resultados de la sección 4.1.5, en esta sección, se adiciona la demanda del sistema de trenes propuesto, para cada año, mostrando que todos los escenarios del 2016 al 2020, tienen un porcentaje de demanda menor al 45 % de la capacidad instalada.

Los resultados presentados en la sección 4.1.6 muestran que, el sistema propuesto de incorporar 10 unidades de trenes eléctricos para la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala es soportado por la matriz energética actual y la de todos los años del plan de energía 2017-2032 del MEM.

Reunidos todos las premisas y argumentos anteriores, se presentan los resultados de la sección 4.1.7, indicando lo siguiente:

Tomando en cuenta que las fuentes renovables para la generación de energía no son estables durante todo el año, es conveniente definir un porcentaje de la base instalada total de la matriz energética por la estabilidad e inestabilidad de las fuentes renovables.

Se ha propuesto una posición conservadora al definir, un porcentaje aproximado del 50 % para la potencia prevista por inestabilidad de fuentes renovables, quedando como $Prnv = 34.5 \% CI$.

De las premisas y aclaraciones anteriores, se obtuvo que 491 unidades de trenes eléctricos para el transporte público en la ruta de ensayo, es la cantidad máxima de trenes que puede soportar la matriz energética proyectada en el plan 2017-2032 del MEM, sin comprometer el suministro de energía para el resto de los sectores de consumo.

Adicional al dato encontrado, se puede concluir que las 10 unidades de trenes eléctricos propuestos para la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, es soportado por la matriz energética actual y la de todos los años del plan de energía 2017-2032 del MEM.

5.2. Contribución en la reducción de emisiones de CO₂ por la implementación de trenes eléctricos en el transporte público

Para esta fase se han hecho 8 puntos de análisis, en las primeras 3 se definen las variables (resultados de secciones 4.2.1 a 4.2.3) el análisis de los resultados presentados en las secciones 4.2.4 y 4.2.5, han sido las herramientas para 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 el país pueda cumplir los compromisos en su NDC.

Los últimos tres puntos de análisis, de los resultados presentados en las secciones 4.2.6 al 4.2.8, son análisis en cuanto al grado de contribución que pueden tener diferentes áreas del transporte terrestre, estos análisis se han realizado con los datos que se cuenta y se recopilaron para este estudio, buscando coherencia con la secuencia de esta investigación, dado que no han sido alcance definidos para esta investigación.

La sección 4.2.1 muestra el ordenamiento del parque vehicular terrestre total, y una clasificación del transporte público urbano, extraurbano y la ruta de estudio, indicando el grado porcentual que le corresponde a cada uno, esto se aprecia en la tabla XXIV de la sección 4.2.1 de los resultados.

De las figuras 8 y 9 de la sección 4.2.1 de los resultados, se puede observar que el transporte público representa alrededor de un 3.4 % del transporte terrestre total.

La sección 4.2.2 muestra los resultados de las emisiones del sector energía, indicando la producción de emisiones de los subsectores generación eléctrica y transporte terrestre, según la figura 10, se puede observar la alta producción por parte del transporte terrestre, con una tendencia en crecimiento.

La sección 4.2.3 muestra el recorrido por parte del transporte público, con este resultado, se puede determinar la actividad de la ruta de estudio, y con ello las emisiones de CO₂ que emite al ambiente.

En la sección 4.2.4, emplea el uso de las variables anteriores, indicando las emisiones de CO₂ producidas por el transporte público guatemalteco, clasificados por urbano, extraurbano y la ruta de estudio, estos datos son

preparados, ordenados y proyectados al 2032, para compararlos con los compromisos de la NDC de Guatemala.

El resultado de la sección 4.2.5, se obtiene con la información antes descrita, y tomando las siguientes premisas adicionales:

- El sistema de trenes propuesto para la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, lo conforman 10 unidades de trenes eléctricos, bajo la distribución de horarios de viaje ida y vuelta en cada media hora, desde las 5:00 hasta las 22:00 horas.
- Tomando en cuenta que las 10 unidades propuestas, no se enfocan en cubrir la demanda de usuarios del transporte en la ruta de estudio, sino en cubrir contingencias y periodos de mantenimientos para las unidades.

Se determina que la propuesta del sistema de 10 trenes permite que el transporte actual sea desplazado por completo, logrando así que la ruta del transporte público de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala esté libre de emisiones de CO₂, para todos los años proyectados del 2016 al 2032, como se indica en la sección 3.4.2 y se refuerza en la sección 5.1, bajo el resultado obtenido de la sección 4.1.6, potencia demandada de trenes.

Por otro lado, también se determina que la ruta de estudio tendrá el valor máximo de emisiones de CO₂e en el año 2032, con 555.43 toneladas, y este valor representa una contribución directa de reducción de emisiones de CO₂ del 0.0010 %.

El resultado obtenido es el impacto directo de la contribución de reemplazar las unidades de transporte público en la ruta de estudio, sin embargo,

también existe el impacto indirecto del transporte privado, tomando en cuenta que cada tren tiene una capacidad de 299 usuarios sentados, es posible que, con su implementación, aumenten los usuarios del transporte.

Con los resultados obtenidos de la sección 4.2.6, es posible realizar el análisis de la contribución indirecta por parte del transporte privado de la ruta de estudio, las premisas tomadas para analizar esta contribución fueron:

- Se contabilizó todas las unidades de transporte terrestre, excepto los que se describían en la clasificación tipo vehículo como autobús, autobús escolar, bus, bus escolar, microbús, microbús escolar, minibús y ómnibus, de la base de datos de la SAT.
- Tomando en cuenta que la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala tiene varios puntos intermedios, como destino final, y algunos un poco más allá de la ruta, se buscó tomar una posición conservadora en el trato de datos, y se contabilizaron las unidades de transporte privado del municipio de Antigua Guatemala, únicamente.
- Se calculó las emisiones bajo el mismo proceso de las secciones 3.4.3.2 y 3.4.3.3. Y los resultados para este tratamiento de datos se observan en la tabla XXVIII figura 13 de la sección 4.2.6 de los resultados.

Comparando los valores de los años 2032, se obtiene:

$$\frac{7,598.507}{55,642,000.00} * 100 \% = 0.0136 \%$$

Con este último resultado, y tomando en cuenta que los datos de la muestra fueron conservadores, por contabilizar únicamente a las unidades de transporte de Sacatepéquez, ignorando los municipios intermedios de esta ruta, se observa que la contribución de las reducciones para la ruta de estudio ha aumentado indirectamente, aunque no significativamente en comparación a los compromisos de la NDC de Guatemala.

Los resultados de las secciones 4.2.5 y 4.2.6, muestran claramente la necesidad de explorar la contribución de las otras áreas del transporte terrestre, por ello se realiza el siguiente análisis:

La sección 4.2.7 muestra la producción total de emisiones de CO₂, por parte del transporte público total, lo cual también se puede visualizar como oportunidad de reducciones, para este enfoque se tomó la siguiente premisa:

- Enfoque en el grado de contribución en la reducción de emisiones que representan estas actividades del transporte público para Guatemala.
- No hay un enfoque en implementar trenes eléctricos para este análisis, por el tipo de datos que se tiene preparado para este estudio, y el alcance de este.

En cuanto a reducciones de las emisiones de CO₂ en Guatemala, el resultado de analizar al transporte público total refleja la oportunidad directa de contribuir en un 1.3 %.

Lo cual parece indicar que es conveniente analizar la totalidad del transporte privado del país, bajo las mismas premisas anteriores.

De lo anterior, se presentan los resultados de la sección 4.2.8, indicando el impacto indirecto en la reducción de emisiones de CO₂ al ambiente, por parte de la totalidad de las unidades del transporte privado del país.

Indicando que para el año 2032, correspondería el potencial de contribución máximo del 30.77 % de las emisiones de todo el país, para el año 2020 se identifica 22.16 %, mientras que para el año 2016 se indica un potencial de contribución del 21.89 %.

Los resultados obtenidos para los años 2032, 2020 y 2016, muestran que el área del transporte privado es el que puede contribuir en altos porcentajes para disminuir las emisiones de CO₂. Por lo que vale la pena concentrar los esfuerzos de reducciones en esta área, buscando estrategias directas e indirectas.

Puntualmente en el año 2032, comparado con compromiso de la reducción de emisiones de CO₂ no condicionada de la NDC de 11.2 % de la tendencia total, se obtiene un resultado de $\frac{30.7730\%}{11.2\%} = 2.75$ veces el cumplimiento del compromiso no condicionado.

Una vez definidas todas las variables, premisas, y el análisis de todos los resultados presentados en la sección 4.2, se puede concluir que:

- De los resultados en las secciones 4.2.5 y 4.2.6, se determina que el sistema propuesto de 10 trenes eléctricos es capaz de reemplazar a todas las unidades de transporte convencionales, logrando reducir por completo las emisiones de dióxido de carbono que emite el transporte público de la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, sin embargo, el impacto directo en las reducciones totales del país no es significativo para los compromisos planteados en la Contribución Nacional Determinada.

- Se determina que las reducciones de las emisiones de dióxido de carbono al ambiente, por la implementación de trenes eléctricos en Guatemala, no se observaría en un impacto directo, sino en el impacto indirecto de incentivar a los usuarios del transporte privado, que hagan uso de él, ya que con la tendencia de crecimiento que tienen las unidades del transporte privado, muestra que en el año 2032 produciría un 30 % de las emisiones de todo el país, lo que representa 2.75 veces el cumplimiento de los compromisos planteados en la Contribución Nacional Determinada.

Por otro lado, también es posible realizar las siguientes recomendaciones:

- Para determinar el impacto indirecto real, de implementar un sistema de transporte público con trenes eléctricos, es recomendable realizar un estudio social por medio de encuestas al usuario del transporte privado.
- Por otro lado, se recomienda a la Dirección General de Transportes, que explore métodos sistemáticos para auditar a las unidades en circulación del transporte extraurbano del país.
- Se recomienda al Gobierno de Guatemala que enfoque esfuerzos en iniciativas que promuevan el uso de transporte público a la población, dado que no es en esta actividad donde se concentra el mayor número de emisiones de CO₂e del subsector transporte.

5.3. Acciones para que la capacidad de la matriz energética pueda soportar un sistema de trenes en el transporte público, en la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala

Dado que el sistema de trenes eléctricos propuesto para la ruta de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala contendrá 10 unidades.

Con el resultado concluido en la sección 5.1 de este capítulo, se indica que la matriz energética proyectada al 2032 del plan 2017-2032 del MEM, es capaz de soportar 491 unidades de trenes eléctricos sin comprometer la demanda del consumo de otros sectores.

Y según los resultados obtenidos de la sección 4.3.1, de la de la capacidad de la matriz energética, en cuanto a potencia instalada, se comprueba que la se cumple la condición $CME (Nt = 491) > CME (Nt = 10)$, que determina que no es necesario incrementar la capacidad de la potencia al año 2032.

Por otro lado, de los resultados mostrados en la sección 4.3.2, en cuanto a la evaluación de energía, para el mismo sistema de trenes propuesto, de 10 unidades, se indica que consumirá 60,480 GWh, en total para el año 2032, en todos sus recorridos.

Este valor de energía supera en 2.23 veces el valor de energía proyectada por el MEM en su plan de energía.

De los resultados anteriores, se puede concluir los siguientes puntos:

- La matriz energética del plan de energía 2017 -2032 del MEM, es capaz de soportar la carga del sistema de trenes propuesto para el transporte público en la ruta de Ciudad de Guatemala.
- En cuanto a los niveles de consumo de energía, el sistema de trenes propuesto supera por 2.23 veces a los niveles de consumo previstos por el plan de energía del MEM, por lo que, al implementar un proyecto de este tipo en Guatemala, resulta conveniente recomendar los siguientes análisis:
 - La conveniencia de cubrir la demanda de energía anual con un alto porcentaje de energías renovables, dado la inestabilidad de la fuente de energía.
 - Realizar los estudios eléctricos correspondientes en la red de transporte y distribución eléctrica, para comprobar la existencia de sobrecargas y la necesidad fortalecer los circuitos en las regiones donde se implemente un sistema de trenes, como el propuesto por este estudio.

CONCLUSIONES

1. Según los datos recopilados, funciones tendencia y criterios tomados en este estudio, se demuestra que la matriz energética planteada en el Plan Nacional de Energía 2017-2032 del MEM puede soportar la carga máxima de 491 unidades de trenes eléctricos integrados al transporte público, sin comprometer la demanda eléctrica de otros sectores de consumo.
2. Los resultados de estudió indican que con el sistema propuesto de 10 trenes eléctricos es capaz de reemplazar a todas las unidades de transporte convencionales, logrando reducir por completo las emisiones de dióxido de carbono que emite el transporte público de la ruta Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala, sin embargo, el impacto directo en las reducciones totales del país no es significativo para los compromisos planteados en la Contribución Nacional Determinada.
3. De acuerdo con las proyecciones de este estudio, se observa que para el año 2032, las unidades del transporte produciría un 30 % de las emisiones de todo el país, lo que representa aproximadamente 2.75 veces el cumplimiento de los compromisos planteados en la Contribución Nacional Determinada, demostrando así, que con la implementación de trenes eléctricos en el transporte público de Guatemala, no se observaría en un impacto directo en las reducciones de dióxido de carbono, sino en el impacto indirecto de incentivar a la población del transporte privado para que haga uso del transporte público.

4. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que para lograr reducciones significativas en las emisiones de CO₂ y cumplir con los compromisos de la CND de Guatemala, es necesario adoptar estrategias y acciones gubernamentales que aborden no solo la matriz energética y el transporte público, sino también el transporte privado. Aunque el transporte público sólo representa un 3.4 % del transporte terrestre total, aumentar su uso y reducir el uso del transporte privado son esenciales para lograr un cambio significativo en la huella de carbono del país. Por lo tanto, se requieren políticas gubernamentales que promuevan el uso de transporte público y desincentivar el uso del transporte privado como una solución viable y sostenible para la reducción de las emisiones de CO₂.
5. Al analizar la capacidad de la matriz energética en relación con el sistema de trenes eléctricos propuesto en este estudio, se observa que la matriz energética proyectada en el Plan Nacional de Energía 2017 - 2032 del MEM sería capaz de soportar la demanda del sistema de trenes eléctricos. Sin embargo, es necesario realizar una verificación adicional para asegurar que la red soporte un aumento en los consumos de energía, tomando en cuenta que la implementación de tan solo 10 trenes en la ruta de estudio resultaría en un aumento del consumo de energía en 2.23 veces según lo previsto en el plan de energía del MEM, lo que destaca la necesidad de monitorear la capacidad de la red para satisfacer las necesidades de energía en el futuro.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios eléctricos en la red de transmisión nacional es pertinente para los investigadores de los impactos en los sistemas de generación, transmisión y distribución eléctrica. Esto se debe a la necesidad de implementar sistemas de trenes eléctricos en el transporte público.
2. Realizar un estudio que permita identificar el interés y las condiciones del usuario del transporte privado para utilizar el transporte público se sugiere a los investigadores del área de desarrollo sostenible del país. Esta investigación sería de particular relevancia en caso de implementarse un sistema de transporte de trenes eléctricos, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ al ambiente.
3. Impulsar la promoción del uso del transporte colectivo en la población como una alternativa efectiva para reducir las emisiones de CO₂e en el subsector transporte y fomentar la adquisición de autos eléctricos, constituye una propuesta dirigida al Gobierno de Guatemala.
4. Aumentar la confiabilidad del transporte público mediante la implementación de acciones es una medida propuesta al Gobierno de Guatemala para reducir el crecimiento del parque vehicular privado, el cual constituye una fuente significativa de emisiones de dióxido de carbono al ambiente.

5. Implementar métodos sistemáticos para auditar a las unidades en circulación y la tasa de usuarios del transporte extraurbano del país se propone a la Dirección General de Transportes.

REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (2020). *Mercado eléctrico de Guatemala*. Guatemala: Autor.
2. Administrador del Mercado Mayorista (2023). *Sítio web Generación por tipo de recurso (GWh)*. Guatemala: Autor.
3. Breeze, P. (2019). *Power generation technologies*. Gran Bretaña: British Library Cataloguing-in-Publication Data.
4. Chicojay, C. A. (2010). *Impacto en la matriz energética de guatemala debido a la generación de energía eólica* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
5. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018). *Estadísticas de producción de electricidad de los países del sistema de la integración centroamericana (SICA) datos preliminares a 2017*. Ciudad de México, México: Naciones Unidas.
6. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2020). *Estadísticas del subsector eléctrico de los países del sistema de la integración centroamericana (SICA) 2018*. Ciudad de México, México: Naciones Unidas.

7. Comisión Económica para America Latina y el Caribe. (2021). *Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA)*. Ciudad de México, México: Naciones Unidas.
8. De Blas, I., Mediavilla, M., Capellán-Pérez, I., y Duce, C. (noviembre, 2020). The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm. *Energy Strategy Reviews*, 32(32), 1-3.
9. Dincer, I., y Zamfirescu, C. (2014). *Advanced power generation systems*. Ontario, Canadá: University of Ontario Institute of Technology.
10. Dirección General de Transportes. (2022). *Resolución No UIP-DGT-257-2022*. Guatemala: Autor.
11. Glover, J. D. (agosto, 1984). Train voltage analysis for ac railroad electrification. *IEEE Transactions Onindustry Applications IA*, 20(33), 925-934.
12. Gobierno de Guatemala. (2014). *Contribución prevista y determinada a nivel nacional*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
13. Goldemberg, J., y Tadeo P, L. (julio, 2010). The decarbonization of the world's energy matrix. *Energy Policy*, 38(19), 3274-3276.
14. Lizarazu, R. (mayo, 2013). Escenarios de emisión de gases de efecto invernadero CO₂ en el sector energético en Bolivia. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*, (19), 77-98.

Recuperado de
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2074-47062013000100004&lng=es&tlng=es.

15. Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Informe balance energético 2016*. Guatemala: Autor.
16. Ministerio de Energía y Minas. (2017a). *Balance energético 2017*. Guatemala: Autor.
17. Ministerio de Energía y Minas. (2017b). *Informe estadístico dirección general de energía 2016*. Guatemala: Autor.
18. Ministerio de Energía y Minas. (2017c). *Plan nacional de energía 2017-2032*. Guatemala: Autor.
19. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Balance energético 2018*. Guatemala: Autor.
20. Ministerio de Energía y Minas. (2019a). *Balance energético 2019*. Guatemala: Autor.
21. Ministerio de Energía y Minas. (2019b). *Informe estadístico 2018*. Guatemala: Autor.
22. Ministerio de Energía y Minas. (2019c). *Política energética 2019-2050*. Guatemala: Autor.

23. Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Informe estadístico 2019*. Guatemala: Autor.
24. Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Gases de efecto invernadero del sector energético 2021*. Guatemala: Autor.
25. Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Revistas de Balance Energético Anuales*. Guatemala: Autor.
26. Montzka, S., Dlugokencky, E., y Butler, J. (agosto, 2011). Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476(1), 43-50.
27. Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. París: Autor.
28. Naciones Unidas. (2021). *Contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC)*. París: Autor.
29. Pinzón, A. y Herrera, I. (mayo, 2009). Cálculo de demanda eléctrica de un sistema de tren de cercanías. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 1(41), 57-62. Recuperado de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/2851/1647>.
30. Renfe (2023). *Flota de trenes*. España: Autor. Recuperado de <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/flota-de-trenes/s-130>.
31. Rúa, C., Arango, S., y Larsen, E. R. (septiembre, 2017). Construction of a Chilean energy matrix portraying energy source substitution: A

system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 162(80), 903-913.

32. Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático. (2022). *Inventario de gases de efecto invernadero, transporte, dentro y fuera de carretera, emisiones de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) Históricas y Tendenciales (1990-2050)*. Guatemala: Autor.

33. Stanley R., B. (agosto, 2001). Renewable energy today and tomorrow. *Proceedings of the IEEE*, 89(8), 1216-1226.

34. Sun, J. (octubre, 2003). The decrease of CO₂ emission intensity is decarbonization at national and global levels. *Energy Policy*, 33(8), 975-978.

35. Superintendencia de Administración Tributaria (2022). *Ánálisis estadístico del parque vehicular*. Guatemala: Autor.

36. Vandajon, P., Bosquet, R., Coiret, A., y Gautier, M. (noviembre, 2016). Model of high-speed train energy consumption. *EURAILTEST and SNCF/AEF*, 1(1) , 1-7. Recuperado de [https://hal.science/hal-02012129/document#:~:text=According%20to%20Akerman%20%5B3%5D%2C,kilometer%20%2D%20kWh%2Fpkm\).](https://hal.science/hal-02012129/document#:~:text=According%20to%20Akerman%20%5B3%5D%2C,kilometer%20%2D%20kWh%2Fpkm).)

37. Vasquez, L. (noviembre, 2018). Energy system planning towards renewable power system: energy matrix change in cuba by 2030. *IFAC-PapersOnLine*, 51(28), 522-527.

38. Wang, J., y Rakha, H. A. (febrero, 2017). Electric train energy consumption modeling. *Applied Energy*, 193(24), 346-355.
39. White, P. (2017). *Public transport*. Londres, Inglaterra: Routledge, Taylor & Francis.
40. 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. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1(1), 1-6.
41. Zhang, H., Jia, L., Wang, L., y Xu, X. (marzo, 2019). Energy consumption optimization of train operation for railway systems: algorithm development and real-world case study. *Journal of Cleaner Production*, 214(92), 1024-1037.

ANEXOS

Anexo 1. Resolución No. UIP-DGT-258-2022 RESOLUCION 257-2022



MINISTERIO DE
COMUNICACIONES,
INFRAESTRUCTURA
Y VIVIENDA



01

UNIDAD DE INFORMACIÓN PÚBLICA. Dirección General de Transportes, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Guatemala, doce de septiembre de dos mil veintidós.

Resolución No. UIP-DGT- 257-2022

Se tiene a la vista para resolver, la solicitud de información pública contenida dentro del expediente, la cual fuera presentada por: Carlos Daniel Coguox González, de conformidad con lo que al efecto estipula la Ley de Acceso a la Información Pública, Decreto número 57-2008 del Congreso de la República. El interesado señaló el número telefónico: 41244869 como lugar para recibir notificaciones.

CONSIDERANDO

Según solicitud de fecha 07 de septiembre de 2022, El interesado presentó solicitud de información pública No. UIP-DGT-258-2022, en la cual requiere lo siguiente:

"La cantidad de unidades de transporte público autorizadas en la ruta extraurbana de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala." [SIC].

CONSIDERANDO

Que en el presente caso la solicitud presentada por el interesado se ajusta a las prescripciones legales aplicables, se confirió el trámite respectivo en la Sección de Archivo, a través de esta Unidad de Acceso a la Información Pública, de la Dirección General de Transportes en cumplimiento al Artículo 38 de la Ley de Acceso a la Información Pública, Decreto número 57-2008 del Congreso de la República, que preceptúa "Procedimiento de acceso a la información pública. El procedimiento para el acceso a la información pública se inicia mediante solicitud verbal, escrita o vía electrónica que deberá formular el interesado al sujeto obligado, a través de la Unidad de Información".

CONSIDERANDO

Que el solicitante incurre en responsabilidad civil y penal por el mal uso, manejo y/o difusión que haga con la información solicitada en la Dirección General de Transportes, de conformidad con el Artículo 15 de la Ley de Acceso a la Información Pública, "Uso y difusión de la información. Los interesados tendrán responsabilidad, penal y civil por el uso, manejo o difusión de la información pública a la que tengan acceso, de conformidad con esta ley y demás leyes aplicables".

POR TANTO

Con base en lo considerado y lo estipulado en los artículos 1, 3, 28, 30 y 31 de la Constitución Política de la República de Guatemala; artículos del 1 al 6, 8, 16 al 20, 22 numeral 4, 30 numeral 5, 38, 42, 43, 45 y 64 de la Ley de Acceso a la Información Pública Decreto número 57-2008 del Congreso de la República.

15 calle 11-41, zona 1, Guatemala.

Teléfono: (502) 2299-0200

www.dgt.gob.gt Síguenos en DGTguate

Fuente: Dirección General de Transportes (2022). Resolución No UIP-DGT-257-2022.

Anexo 2. Desplegado de las rutas autorizadas de Ciudad de Guatemala a Antigua Guatemala

nombre	Apellido(s)	No de Concesión	No de origen	Horario destino	Vía	Origen	Destino	Depósito	Fecha de vencimiento	Tipo de Vehículo	Placa	Matr.	Modelo	No de Asientos	No de Tarjetas	Propietario/Obse- rvaciones	
DESPESAJE DE LAS RUTAS AUTORIZADAS DE CIUDAD GUATEMALA A ANTIGUA GUATEMALA																	
Transportes Primorosa S.A.	Rep. L. José Ricardo Flores G.	0-17584				De: Antigua Guatemala, departamento de Sacatepéquez; A: La Ciudad de Guatemala; Vía: Jocotenango, Santa Lucia Milpas Altas, San Lucas Sacatepéquez Y Vicereyes. horas.	Sale de Ciudad Capital de Guatemala a Guatemala las: 05:30. 06:00, 15:15 y 16:00 horas.			14-may-26	Bus	C-316BMZ	International	1992	54	0-18368	La Primorosa
Transportes Primorosa S.A.	Rep. L. José Ricardo Flores G.	0-17584				De: Antigua Guatemala, departamento de Sacatepéquez; A: La Ciudad de Guatemala; Vía: Jocotenango, Santa Lucia Milpas Altas, San Lucas Sacatepéquez Y Vicereyes. horas.	Sale de Ciudad Capital de Guatemala a Guatemala las: 05:30. 06:00, 15:15 y 16:00 horas.			14-may-26	Bus	C-210BLM	International	1997	54	0-18367	La Primorosa

Continuación anexo 2.

65

De: Antigua Guatemala, departamento de Sacatepéquez; A: La Ciudad de Guatemala Vía: Jocotenango, Santa Lucia Milpas Altas, San Lucas Sacatepéquez y Vicuveras.	Sale de Ciudad Antigua Guatemala a Guatemala Capital de Guatemala las: 05:30, 06:00, 15:15 y 16:00 horas.	Sale de Ciudad Antigua Guatemala a Guatemala Capital de Guatemala las: 10:00, 11:00, 18:00, y 18:15 horas.	Sale de Ciudad Antigua Guatemala a Guatemala Capital de Guatemala las: 08:10, 08:30, 14:40, 14:50 y 15:00 horas.	Sale de Ciudad Antigua Guatemala a Guatemala Capital de Guatemala las: 12:10, 12:30, 17:00, 17:10 y 17:20 horas.
Rep. L. José Ricardo Flores G. 0-1794				
Transportes Primorosa S.A.				
Transportes y Servicios	Terrestres Orellana S.A.	0.18314		

Continuación anexo 2.

Transportes y Servicios	Terrestres Orellana S.A.	0-18349	Sale de Ciudad de Antigua Guatemala, desde las: 04:00 hasta las 22:00 horas, conforme turnos rotativos establecidos con los demás transportista 5. saliendo cada 05 minutos.	Ciudad de Antigua Guatemala, cabecera departamental de Sacatepéquez, A: Ciudad Capital de Guatemala, Vía: Jocotenango, Santa Lucia Milpas Altas, San Lucas Sacatepéquez y Viceversa.	Sacatepéquez	Guatemala	02-dic-22 Bus	C-197BLX	International	1995	54-0-16146	Transportes Orellana
Transportes y Servicios	Terrestres Orellana S.A.	0-18343	Sale de Ciudad de Antigua Guatemala, desde las: 04:00 hasta las 20:00 horas, conforme turnos rotativos establecidos con los demás transportista 5.	Ciudad de Antigua Guatemala, Cabecera departamental de Sacatepéquez a Ciudad Capital de Guatemala, Vía: Jocotenango, Santa Lucia Milpas Altas, San Lucas Sacatepéquez y Viceversa.	Sacatepéquez	Guatemala	27-nov-22 Autobus	C-595BK	International	1996	54-0-16140	Transportes Orellana



6

Continuación anexo 2.

Continuación anexo 2.

Fuente: Dirección General de Transportes (2022). *Resolución No UIP-DGT-257-2022*.