



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PLAN DE
EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL
SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN, DE LAS REDES DE 69 KV DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Axel Ernesto Siguí Gil

Asesorado por el MSc. Ing. José Rafael Argueta Monterroso

Guatemala, marzo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PLAN DE
EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL
SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN, DE LAS REDES DE 69 KV DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

AXEL ERNESTO SIGUÍ GIL

ASESORADO POR EL MSC. ING. JOSÉ RAFAEL ARGUETA MONTERROSO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García (a. i.)
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DISEÑO DEL ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN, DE LAS REDES DE 69 KV DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 8 de febrero de 2016.

Axel Ernesto Siguí Gil



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226



ADSE-MEAPP-011-2015

Guatemala, 08 de febrero de 2016.

Director:
José Francisco González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Axel Ernesto Siguí Gil** carné número **2011-14272**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Energía y Ambiente**.

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

Sin otro particular, atentamente,

José Rafael Argueta Monterroso
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 2913

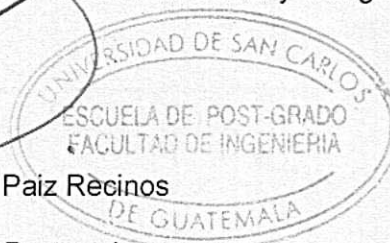
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

Msc. Ing. José Rafael Argueta Monterroso
Asesor (a)

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
/la



REF. EIME 13.2016.
Guatemala, 3 de MARZO 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN, DE LAS REDES DE 69 KV DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario Axel Ernesto Sigüí Gil, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

LEA Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Director

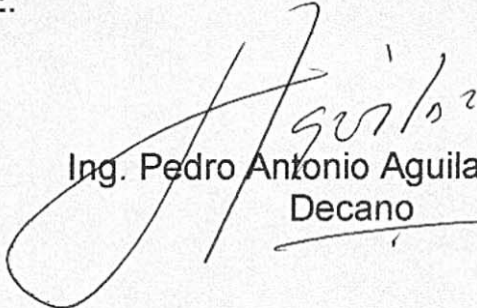
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN, DE LAS REDES DE 69KV DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Axel Ernesto Siguí Gil**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, marzo de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por brindarme sabiduría, inteligencia y fuerza de voluntad para alcanzar esta meta.
- Mis padres** Norman Leonel Siguí Fajardo y Patricia Amelia Gil Urízar, por todo el apoyo y esfuerzo brindado, por darme las oportunidades y facilidades para poderme desarrollarme como profesional y como ser humano.
- Mis hermanos** Norman Leonel Siguí Gil y Mynor David Siguí Gil, por el apoyo incondicional, sus consejos y enseñanzas.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por formarme como profesional.

Facultad de Ingeniería

Por ser mi casa de estudios y por todas las grandes enseñanzas.

Mi asesor

José Rafael Argueta Monterroso, por la asesoría y consejos brindados en el desarrollo de este trabajo.

CNEE

Por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

Mis amigos

Por la compañía a lo largo de toda la carrera, y por el apoyo en los momentos más difíciles.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. OBJETIVOS	11
5.1. Objetivo general	11
5.2. Objetivos específicos	11
6. ALCANCES	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Sistema eléctrico	15
7.2. Generación	15
7.3. Distribución.....	16
7.4. Transmisión	19
7.5. Margo legal.....	22

7.6.	Ley General de Electricidad	24
7.7.	PET-1-2009.....	25
7.8.	Conceptos básicos.....	32
7.8.1.	Flujo de potencia.....	33
7.8.2.	Análisis de contingencias.....	33
7.8.3.	Tipos de barra	33
7.8.4.	Nodos.....	34
7.8.5.	Elementos activos y pasivos	34
7.8.6.	Método de Newton Raphson.....	35
7.8.7.	Método de Gauss Seidel.....	35
7.8.8.	Índices de electrificación	36
7.8.9.	Precio <i>spot</i>	36
7.8.10.	Tarifa base	36
7.8.11.	Tarifa social.....	36
7.8.12.	Análisis de confiabilidad.....	37
7.8.13.	Criterios probabilísticos	37
7.8.14.	Criterios determinísticos.....	37
7.8.15.	Energía no suministrada	39
8.	ÍNDICE PROPUESTO	41
9.	METODOLOGÍA	45
9.1.	Diseño de investigación.....	45
9.2.	Tipo de estudio	45
9.3.	Variables e indicadores.....	45
9.4.	Fases de la metodología.....	45
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	49

11.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	51
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	53
13.	BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Participación en producción de energía por tipo de tecnología	16
2.	Evolución de las tarifas	17
3.	Desagregación de la tarifa social EEGSA	18
4.	Composición por tipo de consumo de energía	18
5.	Sistema Nacional Interconectado.....	20
6.	Componentes del diagrama unifilar.....	21
7.	Resultados de peaje.....	22
8.	Estructura del sector eléctrico	23
9.	Marco legal en Guatemala	24
10.	Sistema de transporte de Guatemala, previo a la implementación del PET-1-2009	26
11.	Mapa de Guatemala con proyecto PET-1-2009	27
12.	Cronograma de actividades	52

TABLAS

I.	Diferencia entre criterios probabilísticos y determinísticos.....	38
II.	Variables dependientes.....	44
III.	Variables independientes	44
IV.	Recursos y disponibilidad.....	53
V.	Análisis de costos.....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
US\$	Dólar, moneda de Estados Unidos
GWh	Gigavatio hora
km	Kilómetros
kWh	Kilovatio hora
kV	Kilovoltios
MW	Megavatio
MVA	Megavoltioamperio
Q	Quetzal, moneda de Guatemala

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista, entidad privada encargada de coordinar las transacciones de los participantes del mercado mayorista de electricidad; así también es la encargada de velar por el mantenimiento de la calidad y seguridad del suministro de energía eléctrica.
Análisis de contingencia	Análisis probabilístico para predecir los voltajes y corrientes que se distribuyen en la red al momento que se conecta o desconecta una línea del sistema.
CENS	Costo de la energía no suministrada; el costo de la energía es diez veces el valor del cargo unitario por energía de la tarifa simple para usuarios conectados en baja tensión, sin cargo de demanda, de la ciudad de Guatemala, del primer día y primer mes del periodo de control evaluado.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Es el órgano técnico encargado de cumplir y hacer cumplir la Ley General de Electricidad.
Deocsa	Distribuidora de Electricidad de Occidente, Sociedad Anónima.

Deorsa	Distribuidora de Electricidad de Oriente, Sociedad Anónima.
EEGSA	Empresa Eléctrica de Guatemala, Sociedad Anónima.
ENS	Es la energía que se deja de entregar a los usuarios por algún evento en el sistema.
EVAD	Es la metodología para definir el precio de prestar el servicio de distribución de energía eléctrica.
Flujo de potencia	Es el cálculo de la magnitud del voltaje y el ángulo de fase de cada una de las barras en un sistema eléctrico de potencia, en condiciones estables.
MEM	Ministerio de Energía y Minas. Es el órgano del Estado responsable de coordinar y formular las políticas, planes, programas relativos al subsector eléctrico y aplicar la Ley General de Electricidad.
Neplan	Herramienta para simulación de redes.
Peaje	Es un pago devengado a las empresas transportistas, el cual corresponde al permiso otorgado para utilizar las instalaciones para la transportación de potencia y energía eléctrica por parte de terceros.

PET	Plan de Expansión del Sistema de Transporte.
Precio <i>spot</i>	Máximo costo variable en que se incurre cada hora para abastecer un kWh adicional de demanda.
Sistema principal	Es el sistema de transmisión compartido por los generadores.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
Tarifa social	Suministro de energía eléctrica dirigido a usuarios con consumos de hasta 300 kilovatios hora.
VAD	Es la metodología para definir el precio de prestar el servicio de distribución de energía eléctrica.

RESUMEN

Los planes de expansión del sistema de transporte se desarrollan según lo establecido en la política energética vigente guatemalteca aprobada por el Ministerio de Energía y Minas. El Plan de Expansión del Sistema de Transporte PET 1-2009, se realizó según las investigaciones llevadas a cabo por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica publicadas en el Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2008-2022; en dicho informe se estimó cuál debería ser la expansión óptima del sistema de transporte, considerando las restricciones y condiciones del sistema en ese entonces.

La confiabilidad del sistema de transporte y la calidad del servicio son los objetivos principales de los planes de expansión del sistema de transporte. Para cuantificar la importancia de los mismos se calculan los indicadores de confiabilidad anual para el periodo de 2008 al 2019, correspondiente a la entrada de las obras adjudicadas.

La energía no suministrada es el principal indicador de confiabilidad, siendo necesario calcular su impacto económico, lo cual permite analizar la factibilidad de los proyectos adjudicados en los planes de expansión del sistema de transporte y los beneficios a los usuarios por la implementación de las obras.

El estudio se limitó a las redes de 69 kV de la ciudad de Guatemala, en el periodo comprendido del 2008 al 2019, correspondiente a la entrada en operación de los proyectos adjudicados en la licitación abierta PET 1-2009, Plan de Expansión del Sistema de Transporte.

1. INTRODUCCIÓN

Los planes de expansión del sistema de transporte surgieron en Guatemala a partir de la política energética aprobada por el Ministerio de Energía y Minas; dicha política tenía como objetivo primordial aumentar los índices de electrificación en Guatemala y mejorar la calidad de energía eléctrica en las áreas rurales. Es de mucha importancia realizar estudios eléctricos en donde se puede determinar la confiabilidad del sistema; esto permite garantizar la seguridad del mismo y la calidad de la energía, así también permite determinar el impacto económico de dichos proyectos. En el presente informe se realizará un análisis histórico de los planes de expansión del sistema de transporte para las líneas de 69 kV de la ciudad de Guatemala.

En el capítulo I se desarrollan los conceptos básicos necesarios para la realización de los estudios de confiabilidad, así también se incluye un diagnóstico del sector eléctrico en Guatemala, donde se explica cómo se maneja el mercado eléctrico a nivel nacional y regional.

Posteriormente, en el capítulo II, se detalla la situación del sistema de transporte en Guatemala para las líneas de 69 kV; todos los estudios se realizan previos a la implementación de los planes de expansión, se muestra el panorama previo a las modificaciones en la red. Se incluye el cálculo de los indicadores de confiabilidad anual para el periodo comprendido del 2008 al 2019, así también se explica la importancia de dichos indicadores y se detalla la metodología de cálculo para la obtención de los mismos; se calculó el impacto económico, según la energía no suministrada determinada anualmente. Así también se incluyen comparaciones de las mejoras, históricamente.

Por último, en el capítulo III, se comparan los resultados obtenidos en los apartados anteriores con las normas técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica; así también se analizan las mejoras en la red y el impacto en la tarifa eléctrica, según las normas técnicas, y se realizará un análisis financiero de beneficio-costos de las obras adjudicadas.

2. ANTECEDENTES

Los planes de expansión del sistema de transporte se desarrollan según lo establecido en la política energética vigente guatemalteca, aprobada por el Ministerio de Energía y Minas, “El Ministerio de Energía y Minas, como ente rector sectorial (artículo 23 de la Ley de Organismo Ejecutivo) realiza los planes de desarrollo y políticas relativas al subsector eléctrico; coadyuvando para que los costos de los proyectos no sean cargados al usuario final” (MEM, 2014).

El primer Plan de Expansión del Sistema de Transporte surgió en el 2008, derivado de la política energética presente en ese año; dicho plan se desarrolló según las investigaciones llevadas a cabo por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en el Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2008-2022; en el plan se estimó cuál debería de ser la expansión óptima del sistema de transporte, considerando las restricciones y condiciones del sistema.

La importancia del MEM en los planes de expansión está establecido en ley: “al ser declarada de urgencia nacional la electrificación en Guatemala (según el artículo 129, de la Constitución Política de Guatemala), el Ministerio de Energía y Minas, como rector sectorial energético realiza las acciones que están enmarcadas en la Ley General de Electricidad, en donde se indica, en el artículo 3, que el Ministerio de Energía y Minas es el órgano del Estado responsable de formular y coordinar los programas indicativos relativos del subsector eléctrico, actividad que ha sido encomendada a la Dirección General de Energía de este Ministerio” (MEM, 2014).

El objetivo primordial de los planes de expansión del sistema de transporte es cumplir con lo definido en las políticas energéticas: “Dentro de la Política Energética 2,013-2,027 cobra relevancia dentro del marco del primer eje de dicha política, la meta a largo plazo de lograr un 95 % de índice de cobertura eléctrica en el país” (MEM, 2015). Lo que conlleva al aumento de los índices de electrificación rural del Sistema Nacional Interconectado por medio de la ampliación de la cobertura de las redes de transmisión. Así también tiene como objetivo el aumento de la confiabilidad, calidad y seguridad del suministro en la red de distribución, según las normativas vigentes emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

Es importante considerar que el transporte de electricidad es libre; en las perspectivas de los planes de expansión se señala que: “es libre el transporte de electricidad, cuando para ello no sea necesario utilizar bienes de dominio público. El transporte de electricidad que implique la utilización de bienes de dominio público y el servicio de distribución final de electricidad, estarán sujetos a autorización” (CNEE, 2012, p. 15).

Para la elaboración de planes de expansión es necesario analizar la demanda de energía eléctrica histórica y evaluar los fenómenos que esto conlleve, tal como indica CNEE, *Perspectivas de los planes de expansión* (2012): “La demanda de energía eléctrica ha tenido un crecimiento sostenido durante el período de 1986-2007 en promedio en un 7 %, marcándose una disminución de dicho crecimiento durante el período del 2008 a 2010 en promedio de 0,7 % por dos factores: primero la crisis económica mundial iniciada en el 2008 y segundo por las tormentas tropicales Agatha, Alex y Frank, que afectaron Guatemala, así como la erupción del volcán Pacaya, lo que causó un daño en la infraestructura eléctrica de transmisión y distribución” (p. 17).

Los planes de expansión del sistema de transporte han tenido un gran impacto en el Sistema Nacional Interconectado, aumentando significativamente la confiabilidad y seguridad del sistema. Realizar un análisis de confiabilidad histórico de los avances de dichos planes es de vital importancia para cuantificar las mejoras en la red, determinando cómo han mejorado los indicadores de calidad con las obras aprobadas y cómo ha disminuido el costo de la energía no suministrada en el sistema, con el avance de los planes de expansión.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema radica en determinar históricamente las mejoras en la confiabilidad del sistema con los avances de las obras aprobadas en el plan de expansión del sistema de transporte (PET) en la red de 69 kV de la ciudad de Guatemala. Es indispensable conocer el impacto en el sistema para tener un panorama amplio de cómo será la red de transporte, pudiendo determinar las deficiencias del sistema y los beneficios que conlleva el desarrollo del PET en la ciudad de Guatemala.

Para poder incentivar nuevos planes de expansión y fortalecer el sistema eléctrico guatemalteco es necesario cuantificar los alcances que se han obtenido y lo que se logrará con el desarrollo de los mismos. Sin un estudio que presente el impacto técnico y económico en la confiabilidad del sistema de transporte no se pueden realizar proyecciones a largo plazo.

Preguntas de investigación:

- Pregunta general: ¿Cuál es el impacto técnico y económico del Plan de Expansión del Sistema de Transporte en la red de 69 kV en la ciudad de Guatemala?
- Preguntas específicas:
 - ¿Cómo han mejorado los indicadores de calidad de energía desde los inicios del Plan de Expansión del Sistema de Transporte, hasta la finalización del mismo?

- ¿Es considerable la cantidad de energía no suministrada luego de finalizado el Plan de Expansión del Sistema de Transporte?
- ¿El usuario realmente es beneficiado con el desarrollo del Plan de Expansión del Sistema de Transporte?
- ¿Qué tanto ha mejorado la confiabilidad del sistema con las mejoras en la red de 69 kV en la ciudad de Guatemala?
- ¿Se dispondrá de un sistema de transporte seguro y confiable al finalizar las obras autorizadas?

4. JUSTIFICACIÓN

La investigación se fundamenta en las líneas de investigación de energía, analizando las pérdidas y la conservación de la energía en los sistemas de transporte. Así también se abarcan los temas de gestión y políticas energéticas ambientales, dando seguimiento a proyectos energéticos, realizando análisis de inversión, preparación, formulación y evaluación de los proyectos de transporte.

Es necesario cuantificar el impacto técnico y económico que se tiene y el que se obtendrá con la finalización del Plan de Expansión del Sistema de Transporte en la red de 69 kV de la ciudad de Guatemala. Realizar un análisis de contingencias en la red permite evaluar los indicadores de calidad de energía eléctrica, lo que determina la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico. Contar con un registro histórico de los indicadores y la confiabilidad de la calidad de energía eléctrica antes y después de las mejoras en la red de 69 kV de la ciudad de Guatemala, permitirá realizar proyecciones para futuros planes de expansión, lo que permitirá un mejor desarrollo del sistema eléctrico guatemalteco.

La realización del trabajo propuesto tiene un impacto directo en la economía guatemalteca, beneficiando el área de planificación de proyectos eléctricos de expansión, dado que analiza a profundidad el desarrollo de la planificación eléctrica de transporte de Guatemala, y por consiguiente hay un impacto económico en la tarifa eléctrica que todos los usuarios pagan.

Un plan de expansión sólido ayuda a garantizar la continuidad y seguridad del sistema eléctrico, lo cual es muy importante, considerando que la energía eléctrica es un servicio básico.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Determinar el impacto técnico y económico en la confiabilidad del sistema de transporte y la calidad del servicio de distribución de las redes de 69 kV de la ciudad de Guatemala, en el periodo comprendido del 2008 al 2019.

5.2. Objetivos específicos

- Analizar históricamente la confiabilidad de las redes de 69 kV de la ciudad de Guatemala, en el periodo comprendido del 2008 al 2019.
- Cuantificar los beneficios al usuario, comparando la energía no suministrada en el periodo comprendido del 2008 al 2019.
- Determinar técnica y económicamente un impacto de los proyectos autorizados en el plan de expansión del sistema de transporte de las redes de 69 kV de la ciudad de Guatemala.
- Identificar el impacto positivo de los indicadores de calidad de la energía eléctrica, antes y después de las mejoras en la red de 69 kV de la ciudad de Guatemala.

6. ALCANCES

Es necesario contar con un estudio amplio que resalte la importancia de los planes de expansión del sistema de transporte, que describa cómo se han desarrollado los proyectos contratados, los beneficios que han aportado al Sistema Nacional Interconectado y el beneficio social y económico que trae a la población guatemalteca; todo esto es de vital importancia para futuras políticas energéticas, teniendo así un estudio histórico de respaldo sobre cómo incide la implementación de obras nuevas en el sistema de transporte.

Se elaborará un estudio que detalle año con año las mejoras en la calidad de energía derivada de dichos planes; este estudio tiene un gran impacto para futuros proyectos, ya que permitirá identificar los puntos de la red que no sean tan seguros y confiables y los que no cumplan con las normativas técnicas vigentes.

Usualmente, cuando se realizan planificaciones energéticas se suele pensar en proyectos de generación; sin embargo, estos no se pueden llevar a cabo sin un proyecto de transporte que respalde el proyecto de generación y para que una generadora opere de forma óptima es necesario conocer la confiabilidad del sistema eléctrico.

Con el estudio se pretende resaltar la importancia de los planes de transporte y los aspectos a considerar para futuras planificaciones, resaltar las áreas que más se beneficiaron técnica y económicamente y contar con un análisis histórico que resalte los beneficios al sistema, según su desarrollo anual.

La red de transporte de Guatemala es bastante amplia y compleja, razón por la cual se delimitará el problema, al realizar el análisis de las redes de 69 kV de la ciudad de Guatemala; para poder resolver el problema será necesario realizar simulaciones por medio del software Neplan, el cual permite realizar análisis de confiabilidad de las redes para posteriormente efectuar los análisis técnicos y económicos correspondientes; las bases se realizarán anualmente, para poder abarcar todo el periodo comprendido por el plan de expansión del sistema de transporte.

El área de impacto del estudio se incluye en la planificación estratégica de proyectos de transporte, lo cual beneficia a las instituciones gubernamentales encargadas de desarrollar estos estudios para futuras licitaciones y para la formulación de políticas energéticas sólidas y acordes a la situación actual de Guatemala. La elaboración de políticas energéticas sólidas y proyectos de expansión adecuados a las necesidades, beneficia a los usuarios, quienes pagan estas inversiones por medio de la tarifa eléctrica.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico está constituido por el área de generación; posteriormente la energía generada es transportada por medio de líneas de transmisión, la cual se distribuye al usuario por parte de las distribuidoras.

7.2. Generación

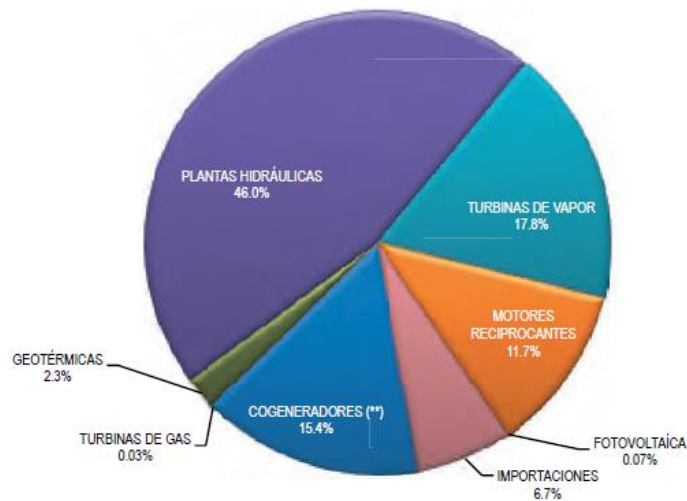
Existen distintos tipos de tecnologías para generación, lo cual depende de la fuente primaria de energía a utilizar. En Guatemala se tuvo la siguiente generación para el 2014; Informe Estadístico AMM (2014): “la generación total de energía para el 2014 fue de 10 490,46 GWh, de los cuales 9 782,26 GWh fueron generados localmente y 708,20 GWh corresponden a energía importada del Mercado Eléctrico Regional y de México.

El 46,00 % de la energía fue de origen hidráulico: 11,67 % de motores recíprocos, 17,76 % de turbinas de vapor, 15,36 % de cogeneradores (también turbinas de vapor), 2,35 % de origen geotérmico, 0,04 % de turbinas de gas, 0,07 % de origen fotovoltaicos y 6,75 % de importaciones.

El consumo local de energía, incluyendo los consumos propios reportados de las unidades centrales generadoras y equipos de transporte de energía eléctrica, alcanzó los 8 953,45 GWh, con un crecimiento del 3,69 % respecto al año anterior.

Las pérdidas en los sistemas de transmisión principal y secundarios fueron de 330,16 GWh, que representan un 3,15 % de la generación total” (p. 1).

Figura 1. **Participación en producción de energía por tipo de tecnología**

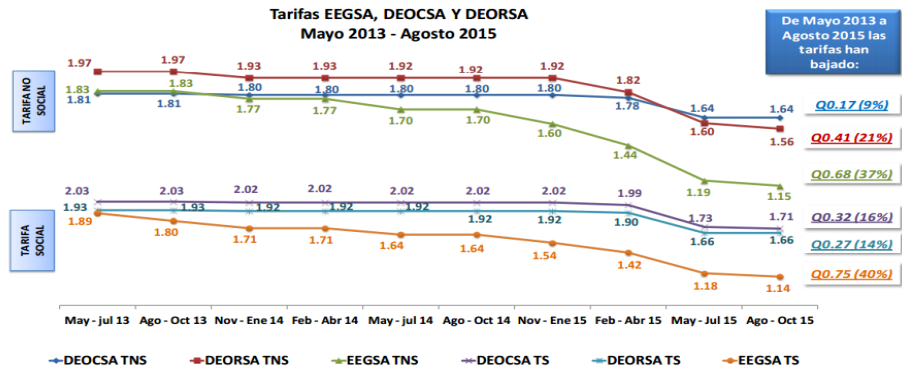


Fuente: AMM. *Informe estadístico, 2014*. p. 2.

7.3. Distribución

En Guatemala existen tres grandes distribuidoras: Empresa Eléctrica de Guatemala, Sociedad Anónima (EEGSA), Distribuidora de Electricidad de Occidente, Sociedad Anónima (Deocsa) y Distribuidora de Electricidad de Oriente (Deorsa), adicionalmente existen 16 empresas eléctricas municipales.

Figura 2. Evolución de las tarifas



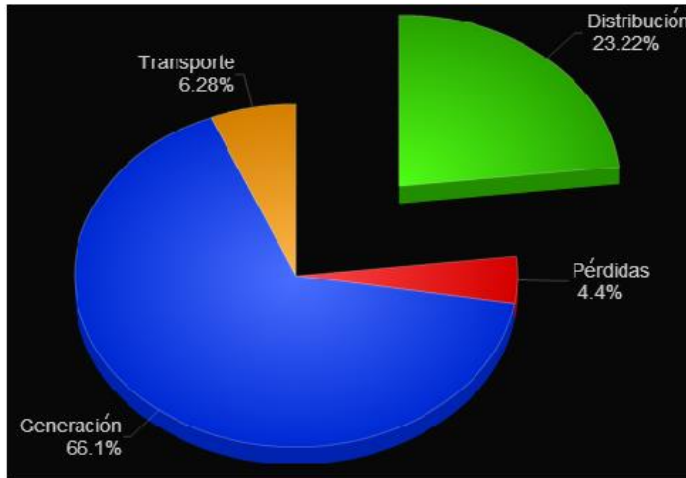
Fuente: CNEE. *Ajuste tarifario, agosto 2015*. p. 2.

La CNEE es la encargada de calcular la tarifa eléctrica, realizando estudios periódicos y ajustes tarifarios trimestrales.

La tarifa eléctrica incluye los costos de generación, transporte, distribución y un porcentaje de pérdidas. Así también, la CNEE es la encargada de definir el valor agregado de distribución (VAD), de las distribuidoras.

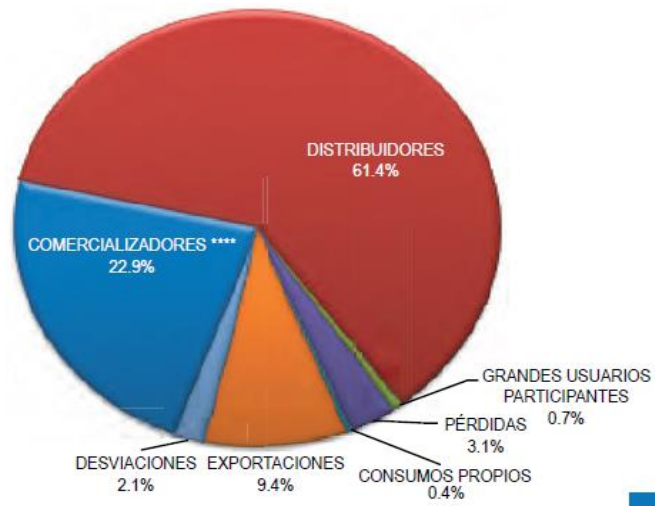
El EVAD es la metodología para definir el precio de prestar el servicio de distribución de energía eléctrica.

Figura 3. **Desagregación de la tarifa social EEGSA**



Fuente: CNEE. *Ajuste tarifario, agosto 2015*. p. 1.

Figura 4. **Composición por tipo de consumo de energía**

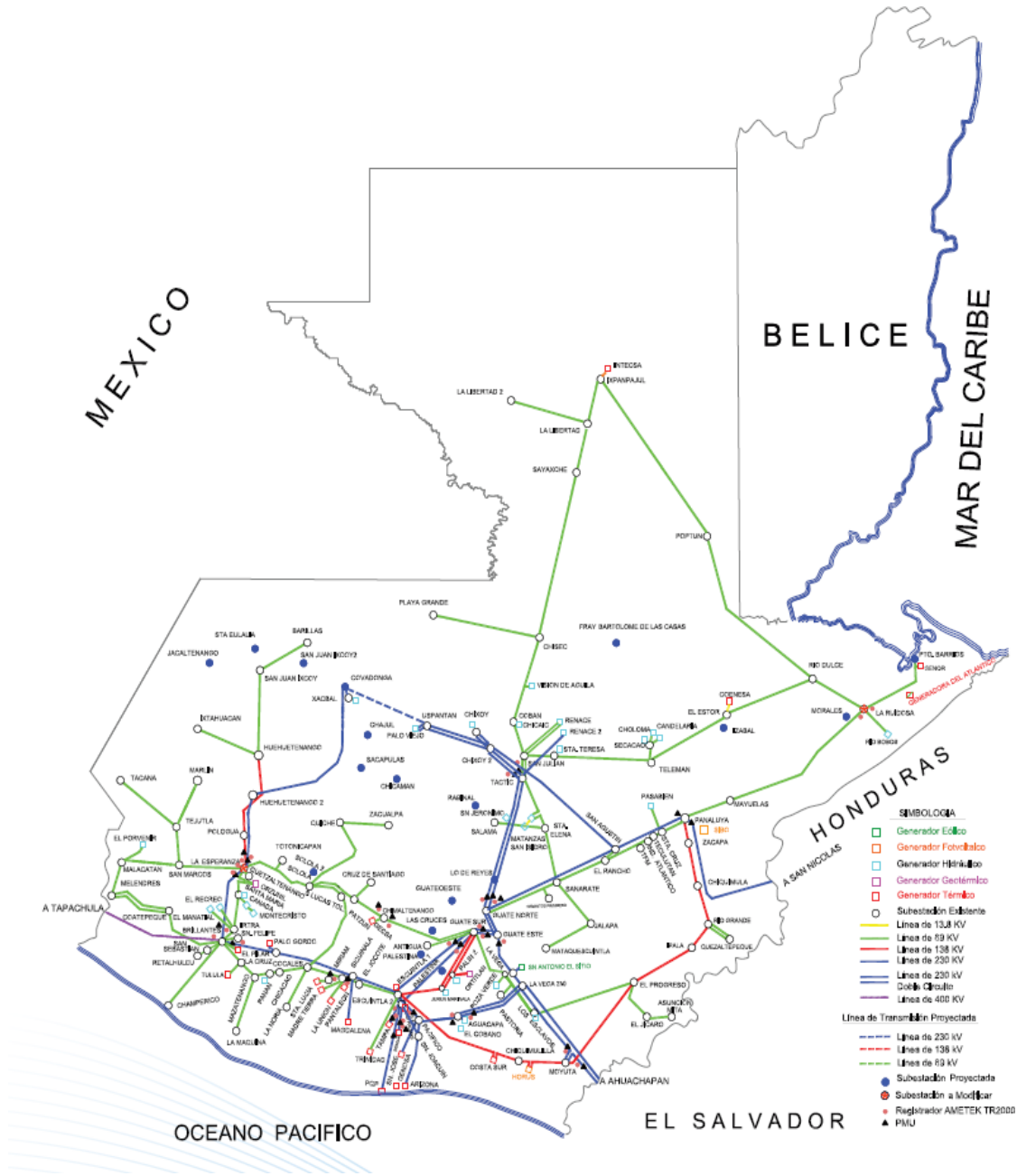


Fuente: AMM. *Informe estadístico, 2014*. p. 2.

7.4. Transmisión

La Ley General de Electricidad define el Sistema Nacional Interconectado como: “el conjunto de instalaciones, centrales generadoras, líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, redes de distribución, equipo eléctrico, centros de carga y en general toda la infraestructura eléctrica destinada a la prestación del servicio, interconectados o no, dentro del cual se efectúan las diferentes transferencias de energía eléctrica entre diversas regiones del país”. (p. 6).

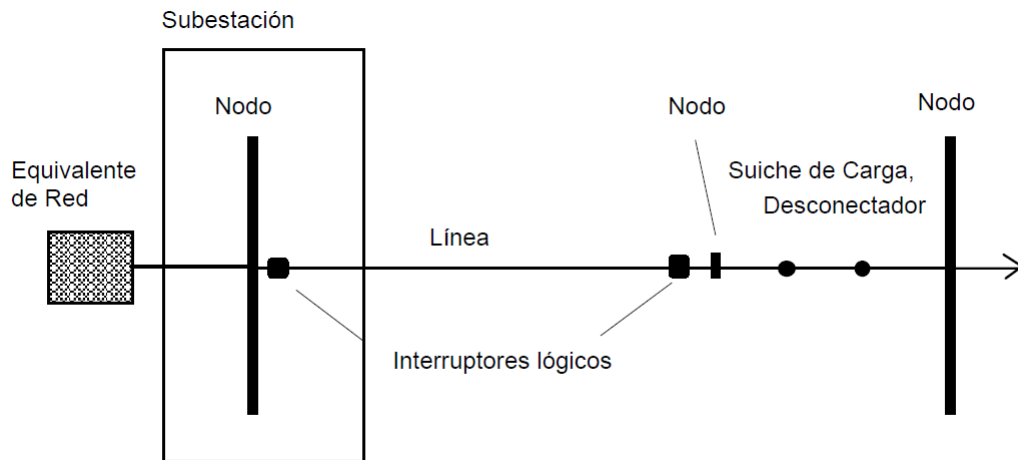
Figura 5. Sistema Nacional Interconectado



Fuente: AMM. Informe estadístico 2014. p. 14.

La red de transporte se encarga de llevar la energía de un punto a otro. Esta red se representa por medio de un diagrama unifilar para esquematizar las redes del sistema y sus componentes, de la siguiente forma:

Figura 6. **Componentes del diagrama unifilar**



Fuente: *Manual Neplan V 5. p. 6.*

El Sistema de Transporte de Guatemala está integrado únicamente por siete empresas transportistas:

- Transportista Eléctrica Centroamericana, S. A (Trec)ec
- Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica (ETCEE)
- Transportista de Electricidad de Centro América, S. A (Trecsa)
- *Duke Energy Transmission*
- Transnova
- Transportista Eléctrica de Occidente
- Recsa

El peaje es un pago devengado a las empresas transportistas, el cual corresponde al permiso otorgado para utilizar las instalaciones para la transportación de potencia y energía eléctrica por parte de terceros.

Figura 7. Resultados de peaje

	PEAJE MENSUAL PARA EL SISTEMA PRINCIPAL US\$	PEAJE MENSUAL PARA EL SISTEMA SECUNDARIO US\$		SISTEMA SECUNDARIO TRANSMISION	PRECIO UNITARIO US\$/KWh	POTENCIA TRANSMITIDA KWh	CAT / 12 US\$
ENERO	4,538,102.76	4,210,649.01	1	Transmisión TRELEC - San José	0.236	132,000	31,191.64
FEBRERO	4,538,102.76	4,215,930.77	2	Transmisión TREL C - PQP	0.274	123,970	33,960.05
MARZO	4,538,102.76	4,215,911.02	3	Transmisión TREL C - PQP	0.274	110,000	30,133.14
ABRIL	4,538,102.76	4,216,390.53	4	Transmisión Miriam - La Unión	0.491	38,000	18,676.24
MAYO	4,548,320.25	4,217,852.01	5	Transmisión Laguna - Textiles del Lago	0.147	15,960	2,347.85
JUNIO	4,548,320.25	4,217,651.67	6	Transmisión Laguna - Textiles del Lago	0.150	45,285	6,792.68
JULIO	4,548,320.25	4,218,260.38	7	Transmisión Mayan Golf - La Libertad	0.429	15,876	6,813.53
AGOSTO	4,548,320.25	4,218,185.20	8	Transmisión TRELEC - Santa Ana	0.465	36,382	16,919.29
SEPTIEMBRE	4,590,905.03	4,217,506.00	9	Transmisión TRELEC - Concepción	0.311	25,956	8,068.07
OCTUBRE	4,645,090.48	4,217,879.02	10	Transmisión Palín 2	0.860	3,924	3,373.66
NOVIEMBRE	4,703,357.03	4,228,297.37	11	Transmisión Ortitlán	0.728	21,226	15,460.93
DICIEMBRE	4,614,177.92	4,201,429.67	12	Transmisión Río Bobos	2.355	10,000	23,552.72
	54,899,222.46	50,595,942.66	13	Transmisión Telemán - Secacao	0.264	15,560	4,111.54
			14	Transmisión Telemán - Secacao	0.264	4,300	1,136.22
			15	Transmisión Telemán - Secacao	0.264	9,651	2,550.16
			16	Transmisión Escuintla 2 - San José	0.039	132,000	5,104.20
			17	Transmisión Escuintla 2 - PQP	0.022	123,970	2,704.48
			18	Transmisión Escuintla 2 - PQP	0.022	110,000	2,399.72
			19	Transmisión Escuintla 2 - Sidegua	0.134	38,000	5,104.20
			20	Transmisión Escuintla 2 - Tampa	0.065	78,770	5,104.20
			21	Transmisión Los Brillantes - IRTRA	0.208	26,129	5,441.52
			22	Transmisión ETCEE - El Porvenir	8.141	2,000	16,281.28
			23	Transmisión Los Brillantes - México	0.546	283,491	154,665.09
			24	Transmisión Duke Energy	0.627	161,338	101,109.19
			25	Transmisión Duke Energy	0.592	7,708	4,562.99
			26	Transmisión Duke Energy	0.628	76,347	47,950.58
			27	Transmisión COV - Xacbal	0.240	94,000	22,584.20

Fuente: AMM. Informe Estadístico 2014. p. 24.

7.5. Marco legal

El sector eléctrico se encuentra estructurado de forma como se presenta en la siguiente figura.

Figura 8. Estructura del sector eléctrico



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word y datos proporcionados por la entidad.

El subsector eléctrico se encuentra regido por el siguiente marco legal presentado en la siguiente figura:

Figura 9. **Marco legal en Guatemala**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

7.6. **Ley General de Electricidad**

La ley General de Electricidad norma el desarrollo del conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad, de acuerdo con los siguientes principios y enunciados:

- Es libre la generación de electricidad y no se requiere para ello autorización o condición previa por parte del Estado, más que las

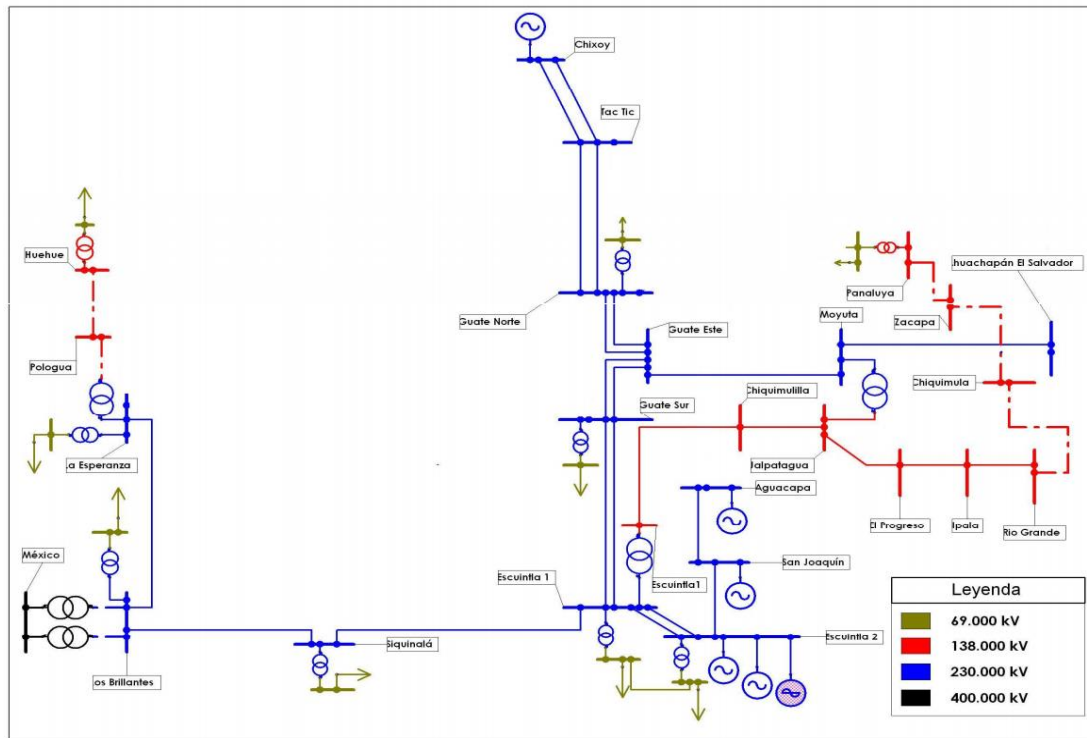
reconocidas por la Constitución Política de la República de Guatemala y las leyes del país.

- Es libre el transporte de electricidad, cuando para ello no sea necesario utilizar bienes de dominio público; también es libre el servicio de distribución privada de electricidad.
- En los términos a que se refiere esta ley, el transporte de electricidad que implique la utilización de bienes de dominio público y el servicio de distribución final de electricidad, estarán sujetos a autorización.
- Son libres los precios por la prestación del servicio de electricidad, a excepción de los servicios de transporte y distribución sujetos a autorización. Las transferencias de energía entre generadores, comercializadores, importadores y exportadores, que resulten de la operación del mercado mayorista, estarán sujetos a regulación en los términos a que se refiere la presente ley.

7.7. PET-1-2009

El Plan de Expansión del Sistema de Transporte es un proceso que se llevó a cabo por medio de una licitación abierta para la prestación de transporte de energía eléctrica por medio de la adjudicación de canon anual. El objetivo principal de este proceso de licitación es fortalecer el sistema de transporte. Entre los objetivos específicos se encuentra aumentar la confiabilidad del sistema y mejorar la calidad de suministro de la red, minimizar la frecuencia y duración de las fallas.

Figura 10. Sistema de transporte de Guatemala, previo a la implementación del PET-1-2009



Fuente: CNEE. *Planes de expansión*. p. 181.

Figura 11. Mapa de Guatemala con proyecto PET-1-2009



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

El PET-1-2009 se conforma por cinco anillos: Metropacífico, Hidráulico, Atlántico, Oriental y Occidental, los cuales se agrupan por medio de 6 lotes:

- Informe de avances CNEE (2015): “Lote A: anillo Metropacífico: cuenta con las siguientes obras de transmisión que, de acuerdo con el plan de transmisión, pertenecen al denominado anillo Metropacífico:
 - Subestación Lo de Reyes 230 kV.
 - Subestación Guate-oeste 230/69 kV, 195 MVA.
 - Subestación Las Cruces 230 kV.
 - Subestación Palín 230/69 kV, 195 MVA.
 - Subestación Pacífico 230 kV.
 - Subestación La Vega 2, 230 kV.
 - Línea de transmisión Guate Oeste-Lo de Reyes 230 kV, con longitud aproximada de 19 km.
 - Línea de transmisión Las Cruces-Guate oeste 230 kV, con longitud aproximada de 13 km.
 - Línea de transmisión Las Cruces-Palín 230 kV, con longitud aproximada de 37 km.
 - Línea de transmisión Palín-Pacífico 230 kV, con longitud aproximada de 22 km.
 - Trabajos de adecuación en la Línea de Transmisión existente Guate este–Jalpatagua 230 kV y conexión en la subestación nueva La Vega 2 de 230 kV.
 - Trabajos de adecuación en la línea de Transmisión Existente San Joaquín–Aguacapa 230 kV y conexión en la subestación nueva Pacífico 230 kV.

- Trabajos de adecuación en la línea de transmisión existente Escuintla 2–San José 230 kV y conexión en la subestación nueva Pacífico, 230 kV.
 - Trabajos de adecuación en la línea de transmisión existente de doble circuito Tactic–Guate norte 230 kV y conexión en la subestación nueva Lo de Reyes, 230 kV.
 - Trabajos de adecuación en la línea de Transmisión en proceso de construcción Aguacapa–frontera con la República de El Salvador y conexión en la subestación nueva La Vega 2, de 230 kV.
 - Trabajos de Interconexión entre las subestaciones Palín 69 kV, en construcción y la subestación nueva Palín 230/69 kV.
- Lote B: anillo Hidráulico: cuenta con las siguientes obras de transmisión que, de acuerdo con el plan de transmisión, pertenecen al anillo hidráulico:
 - Subestación San Juan Ixcoy. 230 kV.
 - Subestación Santa Eulalia. 230 kV.
 - Línea de transmisión Covadonga-Uspantán 230 kV, con longitud aproximada de 43 km.
 - Línea de transmisión San Juan Ixcoy–Covadonga, 230 kV, con longitud aproximada de 23 km.
 - Línea de transmisión Santa Eulalia-San Juan Ixcoy, 230 kV, con longitud aproximada de 27 km.
 - Línea de transmisión Santa Eulalia-Huehuetenango II, 230 kV, con longitud aproximada de 84 km.
 - Línea de transmisión Huehuetenango II-La Esperanza 230 kV con longitud aproximada de 34 km.

- Trabajos de adecuación en 138 kV en la subestación Huehuetenango II.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV en la subestación Huehuetenango II.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV en la subestación La Esperanza.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV en la subestación Uspantán.
 - Ampliación de la subestación Covadonga, 230 kV.
 - Trabajos de adecuación en la línea de transmisión existente Huehuetenango-Pologuá, 138 kV.
- Lote C: anillo Atlántico: cuenta con las siguientes obras de transmisión que, de acuerdo con el plan de transmisión, pertenecen al anillo Atlántico:
 - Subestación La Ruidosa 230/69 kV, 150 MV A.
 - Línea de transmisión La Ruidosa - Panaluya, 230 kV, con longitud aproximada de 102 km.
 - Trabajos de interconexión entre la subestación La Ruidosa, 69 kV, existente y la nueva.
 - Subestación La Ruidosa 230/69 kV.
 - Trabajos de adecuación en 69 kV en la subestación La Ruidosa existente.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV, en la subestación Panaluya.
- Lote D: anillo Atlántico: cuenta con las siguientes obras de transmisión que, de acuerdo al plan de transmisión, pertenecen al anillo Atlántico:
 - Subestación El Estor 230/69 kV, 150 MVA.

- Línea de transmisión Tactic-El Estor, 230 kV, con longitud aproximada de 116 km.
 - Línea de transmisión El Estor-La Ruidosa, 230 kV, con longitud aproximada de 70 km.
 - Trabajos de Interconexión entre la subestación El Estor, 69 kV, existente y la nueva.
 - Subestación El Estor 230/69 kV.
 - Trabajos de adecuación en 69 kV, en la subestación El Estor existente.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV, en la subestación Tactic.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV, en la subestación La Ruidosa 230 kV.
- Lote E: anillos Hidráulico y Atlántico: cuenta con las siguientes obras de transmisión que, de acuerdo al plan de transmisión, pertenecen a los anillos Hidráulico y Atlántico:
 - Subestación El Rancho 230/69 kV, 150 MVA.
 - Línea de transmisión Chixoy II-El Rancho, 230 kV, con longitud aproximada de 115 km.
 - Trabajos de adecuación en 69 kV, en la subestación El Rancho existente.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV, en lo subestación Chixoy II.
 - Trabajos de adecuación en la línea de transmisión Guate Norte–Panaluya 230 kV y conexión a la subestación nueva El Rancho 230 kV.

- Lote F: anillo Occidental: cuenta con las siguientes obras de transmisión, que de acuerdo al plan de transmisión, pertenecen al Anillo Occidental:
 - Subestación Sololá 230/69 kV, 150 MVA.
 - Línea de transmisión Guate sur-Las Cruces 230 kV, con longitud aproximada de 27 km.
 - Línea de transmisión Las Cruces-Sololá 230 kV, con longitud aproximada de 62 km.
 - Línea de transmisión Sololá-La Esperanza 230 kV con longitud aproximada de 51 km.
 - Trabajos de adecuación de la línea de transmisión en 69 kV, Sololá-Quiché y conexión en la subestación nueva Sololá, 230 kV.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV, en la subestación existente Guate sur.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV, en la subestación nueva Las Cruces.
 - Trabajos de adecuación en 230 kV, en la subestación existente La Esperanza”.

7.8. Conceptos básicos

A continuación se describen los diferentes conceptos básicos relacionados con el tema de la energía eléctrica.

7.8.1. Flujo de potencia

Es el cálculo de la magnitud del voltaje y el ángulo de fase de cada una de las barras en un sistema eléctrico de potencia, en condiciones de estado estable. El flujo de potencia puede ser real o reactiva.

7.8.2. Análisis de contingencias

Es un análisis probabilístico para predecir los voltajes y corrientes que se distribuyen en la red al momento de que se conecta o desconecta una línea del sistema, ya sea por causas imprevistas o programadas. Su importancia radica en la seguridad del sistema eléctrico, pudiendo determinar los límites operativos de un sistema, la severidad de las fallas, inestabilidad del sistema y la frecuencia de las contingencias. El análisis de contingencias permite conocer las condiciones del sistema eléctrico en condiciones de estado estable y postransitorio, es decir después de la salida de uno o varios elementos del sistema.

7.8.3. Tipos de barra

- Barra de carga: es la barra de un sistema eléctrico en la que no hay generación eléctrica; al momento de realizar estudios eléctricos se toman registros históricos de la potencia real y la reactiva; por tanto es indispensable conocer los valores de P y Q de una barra de carga.
- Barra de voltaje: es la barra de un sistema en donde la magnitud del voltaje se mantiene constante. En estas barras no puede ser definida Q , ni el ángulo del voltaje, únicamente se conoce la P y el V .

- Barra de compensación: es la barra que se utiliza como referencia para el ángulo del voltaje para las demás barras. Es conocido el voltaje y su ángulo; en el caso de Guatemala se toma como referencia la generadora eléctrica de Chixoy, por su capacidad instalada.

7.8.4. Nodos

Según la guía del usuario de Neplan V5 (2014), se entiende por nodo: “el punto de conexión de dos elementos, o un “lugar” donde se produce o se consume energía eléctrica (generador, carga). Un nodo se describe por medio de:

- Nombre.
- Voltaje nominal del sistema en kV.
- Zona y área.
- Tipo de nodo (barraje de distribución principal, barraje de distribución, barraje aislado, barraje especial)” (p. 6).

7.8.5. Elementos activos y pasivos

Neplan V5, *Guía del usuario* (2014): “Entre los elementos activos se encuentran las máquinas sincrónicas, equivalentes de red, máquinas asincrónicas y unidades generadoras” (p. 7).

Neplan V5, *Guía del usuario* (2014): “Entre los elementos pasivos se encuentran las líneas, acoples, *swiches*, reactores, transformadores de dos y tres devanados, elementos paralelos (*shunts*) y cargas” (p. 7).

7.8.6. Método de Newton Raphson

Sirve para resolver la forma polar de las ecuaciones de flujos de potencia a partir de una función real. Consiste en la expansión en serie de Taylor para una función de dos o más variables.

Stevenson (1985): “el método de Newton Raphson resuelve la forma polar de las ecuaciones de flujo de potencia hasta que los errores ΔP y ΔQ en todas las barras caen dentro de los límites especificados” (p. 314).

7.8.7. Método de Gauss Seidel

Método utilizado para resolver ecuaciones de flujo de potencia en coordenadas rectangulares; mientras más iteraciones se realicen menor será la diferencia entre los voltajes de barra. Se realizan múltiples procesos iterativos hasta que los cambios en cada barra sean menores que un valor mínimo especificado, según el índice de precisión determinado. Este método resulta más simple que el método de Newton Raphson, dado que se necesita un número menor de iteraciones.

Stevenson (1985) afirma que: “el método de Gauss Seidel resuelve las ecuaciones del flujo de potencia en coordenadas rectangulares (variable compleja) hasta que las diferencias en los voltajes de barra de una iteración a otra sean lo suficientemente pequeñas. Ambos métodos se basan en las ecuaciones de admitancias de barra” (p.314).

Nasar (1991) reafirma que: “los métodos de Gauss y Gauss Seidel son procedimientos iterativos para la solución de ecuaciones simultaneas (no lineales)” (p. 93).

7.8.8. Índices de electrificación

Es un parámetro indicativo del porcentaje territorial que dispone de energía eléctrica; según estadísticas, el índice de cobertura es de aproximadamente 85 % en Guatemala. De acuerdo con la política energética 2013-2027: “El departamento con mayor cobertura eléctrica es Guatemala con un 97 %, mientras que el que cuenta con menor cobertura eléctrica es Alta Verapaz, con un 35,4 %” (p. 16).

7.8.9. Precio *spot*

Política energética 2013-2027: “Máximo costo variable en que se incurre cada hora para abastecer un kWh adicional de demanda” (p. 48).

7.8.10. Tarifa base

Política energética 2013-2027 señala que: “estas tarifas son calculadas por la CNEE cada cinco años y serán ajustadas periódicamente mediante la aplicación de fórmulas que reflejen la variación de los costos de distribución. Estas tarifas incluyen cargo por consumidor, cargo por potencia de punta, cargo por potencia fuera de punta y cargo por energía” (p. 48).

7.8.11. Tarifa social

Política energética 2013-2027: en ella se señala que “la tarifa social es el suministro de energía eléctrica dirigido a usuarios con consumos de hasta 300 kilovatios hora (kWh). Se trata de una tarifa especial con carácter social, aplicada al suministro de energía eléctrica dirigida a usuarios regulados conectados en baja tensión sin cargo por demanda, según lo definido en la

Ley General de Electricidad y su Reglamento, así como la Ley de Tarifa Social” (p. 48).

7.8.12. Análisis de confiabilidad

Este análisis tiene como objetivo principal mejorar la seguridad de un sistema eléctrico de potencia, ubicando los posibles errores que se pueden presentar en el sistema. Indicará si un sistema es confiable o no, y los parámetros específicos del sistema.

7.8.13. Criterios probabilísticos

Estos criterios se utilizan para analizar la confiabilidad de un sistema eléctrico de potencia con aleatoriedad de fenómenos. Simular un escenario de flujos de potencia se vuelve mucho más complicado en este caso, debido a la gran cantidad de variables que pueden intervenir.

7.8.14. Criterios determinísticos

Este tipo de criterio se utiliza para examinar un cierto número de situaciones restrictivas para la verificación de qué tan seguro es un sistema eléctrico. Se utiliza para evaluar distintos tipos de escenarios en casos favorables y no favorables y los flujos de carga que proveen una detallada y precisa descripción del sistema eléctrico.

Entre sus desventajas está no considerar la probabilidad de ocurrencia de los casos inesperados, por lo que el riesgo de omitir ciertos escenarios es mayor.

- Criterio N-1: la inestabilidad del sistema no puede ser el resultado de la contingencia simple más severa aplicada al sistema a analizar; es decir que al aplicar una contingencia el sistema sigue operando en condiciones aceptables de funcionamiento, que los flujos se mantienen dentro de los límites normales de operación y no existen inestabilidades. Al momento de simular se evalúa la pérdida de un elemento en la red y la seguridad de operación el sistema.
- Criterio N-2: la inestabilidad del sistema no puede ser el resultado de la contingencia doble más severa aplicada al sistema. Se aplica simulando simultáneamente la salida de dos componentes del sistema. Este criterio es menos utilizado debido a que la probabilidad de que dos sistemas se desconecten simultáneamente es baja.

Tabla I. **Diferencia entre criterios probabilísticos y determinísticos**

Probabilístico	Determinístico
Se analizan eventos.	Se utilizan variables aleatorias.
Trata de determinar cuándo ocurrirá la falla.	Trata de determinar cuánto tiempo durará la falla.
Trata de determinar la cantidad de fallas que ocurrirán en determinado periodo de tiempo.	Número de fallas en un periodo de tiempo.
Determina en qué elementos ocurrirán las fallas.	Determina la ubicación de las fallas, no los elementos.

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

7.9. Energía no suministrada

Es la energía que se deja de entregar a los usuarios por algún evento en el sistema se conoce como ENS y al costo de la energía no suministrada al sistema se le conoce como CENS. Según las normas técnicas del servicio de distribución, CNEE: “el costo de energía es diez veces el valor del cargo unitario por energía de la tarifa simple para usuarios conectados en baja tensión, sin cargo por demanda (BTS), de la ciudad de Guatemala, del primer día y primer mes del periodo de control evaluado” (artículo 58).

8. ÍNDICE PROPUESTO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
3. JUSTIFICACIÓN
4. OBJETIVOS
 - 4.1. Objetivo general
 - 4.2. Objetivos específicos
5. ALCANCE
 - 5.1. Beneficios de la implementación de los proyectos del PET 1-2009
 - 5.2. Análisis histórico de la confiabilidad del sistema eléctrico
 - 5.3. Mejoras en la calidad de energía
 - 5.4. Impacto positivo de los indicadores de calidad de energía eléctrica
 - 5.5. Cuantificar los beneficios al usuario
6. MARCO TEÓRICO
 - 6.1. Sistema eléctrico de potencia
 - 6.1.1. Generación
 - 6.1.2. Distribución
 - 6.1.3. Transmisión
 - 6.2. Flujo de potencia
 - 6.2.1. Tipos de barra

- 6.2.2. Nodos
- 6.2.3. Elementos activos y pasivos
- 6.2.4. Método de Newton Raphson
- 6.2.5. Método de Gauss Seidel
- 6.3. Análisis de contingencias
- 6.4. Análisis de confiabilidad
- 6.5. Conceptos básicos
 - 6.5.1. Índices de electrificación
 - 6.5.2. Precio *spot*
 - 6.5.3. Tarifa base
 - 6.5.4. Tarifa social
 - 6.5.5. Criterios probabilísticos
 - 6.5.6. Criterios determinísticos
 - 6.5.7. Energía no suministrada
- 7. PET-1-2009
 - 7.1 Lote A: Anillo Metropacífico
 - 7.2 Lote B: Anillo Hidráulico
 - 7.3 Lote C: Anillo Atlántico
 - 7.4 Lote D: Anillo Atlántico II
 - 7.5 Lote E: Anillos Hidráulico y Atlántico
- 8. DATOS BASICOS PARA EVALUACIONES
 - 8.1 Estado del sistema de transporte previo al desarrollo de los planes de expansión, en el 2008.
 - 8.2 Indicadores de confiabilidad 2008 al 2019
 - 8.3 Energía no suministrada del 2008 al 2019
- 9. RESULTADOS Y ANÁLISIS

- 9.1 Indicadores de calidad de energía eléctrica según normas técnicas
 - 9.2 Evaluación del impacto de Mejoras en la red eléctrica
 - 9.3 Evaluación del impacto en la tarifa eléctrica
 - 9.4 Análisis beneficio-costos
-
- 10. CONCLUSIONES
 - 11. RECOMENDACIONES
 - 12. BIBLIOGRAFÍA

9. METODOLOGÍA

9.1 Diseño de investigación

Para el desarrollo del estudio se trabajará principalmente con variables cuantitativas, ya que es necesario cuantificar parámetros técnicos y económicos de la red de transporte, para posteriormente calcular los costos de la energía no suministrada en la red de la ciudad de Guatemala. Así también se utilizarán variables cualitativas para poder describir los distintos escenarios propuestos para el cálculo de parámetros técnicos.

9.2. Tipo de estudio

El presente estudio es del tipo descriptivo, dado a que describe datos y características de una muestra; en este caso puntos de la red de 69 kV de la ciudad de Guatemala, para poder modelar las redes del sistema y posteriormente calcular los índices de calidad de servicio y evaluar así la confiabilidad del sistema a analizar.

9.3. Variables e indicadores

Para el estudio de confiabilidad y para el cálculo de la energía eléctrica no suministrada se deben definir las variables que se presentan en la tabla siguiente:

Tabla II. **Variables dependientes**

Variable	Definición	Variables de las que depende
Confiabilidad del sistema.	Conjunto de parámetros que indican que tan confiable es y puede llegar a ser un sistema eléctrico.	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamiento. • Topología de la red. • Inversión económica.
Calidad y seguridad del sistema eléctrico.	Normalización y continuidad del suministro eléctrico, según lo establecido en las normas técnicas.	<ul style="list-style-type: none"> • Interrupciones. • Operación y mantenimiento. • Límites de cargabilidad. • Inversión económica.

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables independientes**

Variable	Unidad	Definición
Interrupciones.	Cantidad de interrupciones.	Tiempo de Interrupción por Usuario (TIU) y Frecuencia de Interrupción por Usuario (TIU).
Operación y mantenimiento del sistema.	\$, Q	El costo de conservar en condiciones óptimas de operación el sistema eléctrico.
Límites de cargabilidad del equipo eléctrico.	V, A	Son los límites de tensión que puede soportar el equipo eléctrico.
Inversión económica.	\$, Q	Mientras más grande sea la inversión, mejores serán los esquemas del sistema y por tanto en la confiabilidad del mismo.
Equipamiento eléctrico.	-	Componentes que conforman el sistema eléctrico.
Topología de la red.	-	Es la forma que la que se encuentra diseñado determinado sector de la red y la configuración de la misma.

Fuente: elaboración propia.

9.4. Fases de la metodología

- Primera fase, investigación bibliográfica:
 - Elaborar base de datos con información histórica anterior al desarrollo de los planes de expansión del sistema de transporte en las redes de 69 kV, de la ciudad de Guatemala.
 - Elaborar base de datos anual del sistema de transporte, según el desarrollo de los proyectos adjudicados para el periodo comprendido del 2008 al 2019.
 - Elaborar base de datos que contenga todos los proyectos adjudicados en los planes de expansión del sistema de transporte, posterior a la implementación de los mismos, para la red de 69 kV, de la ciudad de Guatemala.
- Segunda fase, análisis de datos:
 - Calcular los indicadores de confiabilidad de cada uno de los años del periodo a estudiar.
 - Analizar la confiabilidad, según los indicadores, de cada uno de los años a estudiar.
 - Calcular por medio de software la energía no suministrada para las redes de 69 kV, de la ciudad de Guatemala, y realizar un registro histórico con dicha información.

- Calcular económicamente el costo de la energía no suministrada para todos los años a evaluar.
- Tercera fase, resultados:
 - Evaluar el impacto técnico de la red anterior y posterior a los planes de expansión.
 - Calcular el impacto económico de la red anterior y posterior a los planes de expansión.
- Cuarta fase, propuesta:
 - Evaluar los indicadores de calidad de energía anteriormente calculados, según lo establecido en las normas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
 - Cuantificar las mejoras en la red, según los indicadores de calidad de energía eléctrica.
 - Analizar el impacto, históricamente, en la tarifa eléctrica, para las redes de 69 kV, de la ciudad de Guatemala.
 - Realizar análisis financiero de beneficio-costos de las obras aprobadas.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo del proyecto de investigación, se trabajará principalmente con estadística descriptiva, ya que se analizará un conjunto de datos, siendo estos los parámetros a calcular de los distintos puntos de la red de 69 kV de la ciudad de Guatemala.

Se realizarán análisis de confiabilidad únicamente en áreas específicas de la red. Sin embargo también se hará uso de la estadística inferencial, realizando estimación de parámetros para el cálculo de los indicadores de calidad de energía eléctrica y para el cálculo del costo de la energía no suministrada.

Las herramientas estadísticas a utilizar son las siguientes:

- Estadística descriptiva:
 - Frecuencias estadísticas
 - Distribución de frecuencias
 - Medidas de centralización
 - Medidas de dispersión
 - Medidas de posición

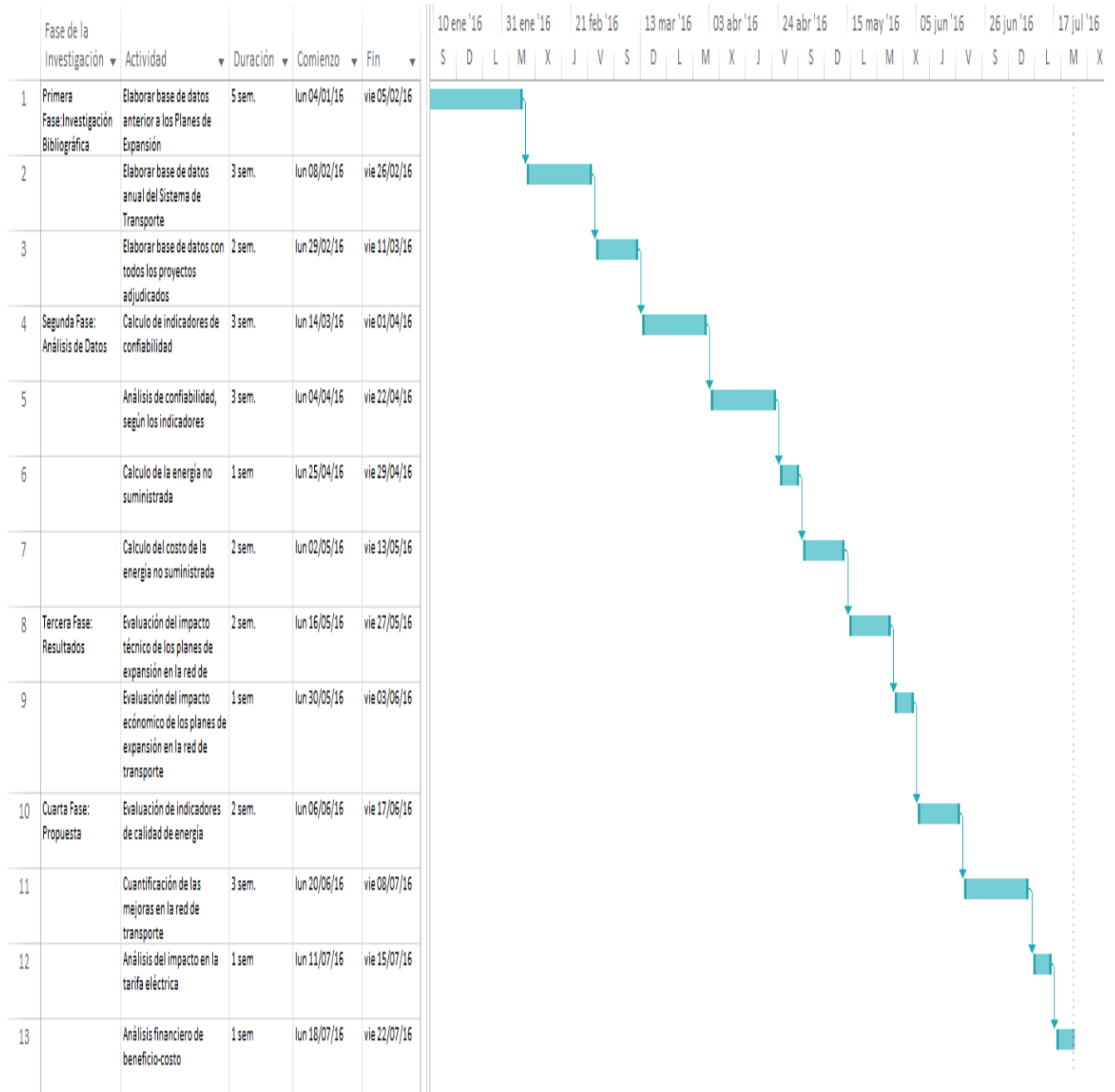
- Estadística Inferencial:
 - Métodos probabilísticos
 - Muestreo aleatorio
 - Distribución muestral

- Niveles de confianza
- Errores de estimación

11. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El cronograma muestra a diferentes escalas las distintas fases de la investigación, las actividades que van a ejecutarse y el tiempo estimado de inicio y finalización de las mismas.

Figura 12. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la realización del estudio es necesario contar con los siguientes recursos:

Tabla IV. Recursos y disponibilidad

Recurso	Disponibilidad
Humano	Investigador: Axel Ernesto Siguí Gil Asesor: Ing. Rafael Argueta Coasesor: Ing. Fernando Moscoso
Financiero	Es necesario contar con la licencia del software Neplan actualizada; dicha licencia será proporcionada por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, teniendo un costo de Q60,00 por cada hora que se utilice.
Equipo de cómputo moderno	Se trabajará en las instalaciones de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, en donde se cuenta con el equipo de cómputo necesario para el uso de programas de simulación.
Acceso a la información	Toda la información técnica y económica la remiten las empresas transportistas a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica; dicha información está a disposición para el desarrollo del trabajo.
Fuentes de financiamiento	Financiamiento propio.

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Análisis de costos**

	Días de trabajo	Horas de trabajo por día	Costo/hora	Total
Uso de software Neplan	30	3,5	Q60,00	Q6 300,00
	Días de trabajo		Costo ida y vuelta	Total
Costos de transporte	30		Q70,00	Q2 100,00
			Honorarios del asesor	Total
			Q2 500,00	Q2 500,00
			Total	Q10 900,00

Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo de la investigación se necesita un total de Q 10 900,00. Sí se dispone de los recursos necesarios para el desarrollo del mismo, siendo estos por financiamiento propio; por lo que la investigación es factible.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ, Maria. *Análisis de herramientas para el estudio de confiabilidad de un sistema eléctrico de potencia*. Uruguay: Instituto de Ingeniería Eléctrica. 2002. 126 p.
2. CNEE. *Normas técnicas de acceso y uso de la capacidad de transporte*. [en línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/02%20NTAUCT.pdf>>. [Consulta: 2 de noviembre de 2015].
3. _____. *Normas técnicas del servicio de distribución*. [en línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/03%20NTSD.pdf>>. [Consulta: 5 de noviembre de 2015].
4. _____. *Perspectivas de los planes de expansión*. [en línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/PlanesExpansion/Docs/Planes%20de%20Expansion%202012%20v2.pdf>>. [Consulta: 12 de noviembre de 2015].
5. _____. *Planes de expansión del sistema eléctrico guatemalteco*. [en línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/PEG/Docs/PET%20esp.pdf>>. [Consulta: 12 de noviembre de 2015].

6. Comisión de Regulación de Energía y Gas. *Reporte de eventos y cálculo de energía no suministrada en los sistemas de transmisión regional*. [en línea]. <://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1aed427ff782911965256751001e9e55/3f006efb1371d29605257a9c00477173/\$FILE/D-052-2012%20REPORTE%20DE%20EVENTOS%20Y%20C%3%81LCULO%20DE%20ENERG%3%8DA%20NO%20SUMINISTRADA%20EN%20EL%20STR.pdf>. [Consulta: 12 de noviembre de 2015].
7. *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*. Pennsylvania. Westinghouse Electric Corp. 1964. 559 p.
8. GLOVER, Duncan. *Sistemas de potencia análisis y diseño*. 3a ed. California, Estados Unidos: Ciencias Ingenierías. 2003. 648 p.
9. GRAINGER, John. *Análisis de sistemas de potencia*. 3a ed. North Carolina, Estados Unidos: McGraw-Hill. 1985. 148 p.
10. MALDONADO, Alejandra. *Estudio de confiabilidad de la red de transmisión del Sistema Nacional Interconectado según las normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones utilizando el software Neplan*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, año 2012. 141 p.
11. Ministerio de Energía y Minas. *Política energética 2013-2027*. [en línea]. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2013/02/PE2013-2027.pdf>. [Consulta: 8 de noviembre de 2015].

12. NASAR, Syed. *Sistemas eléctricos de potencia*. Universidad de Kentucky, Estados Unidos: Schaum.1991. 142 p.
13. VELA, Rodolfo. *Líneas de transmisión México*. México: McGraw-Hill. 1999. 469 p.
14. WAKERLY Dennis. *Estadística matemática*. 7a ed. México: Cengage Learning. 2010. 911 p.
15. WINSTON Wayne. *Investigación de operaciones*. 4a ed. México: Thomson. 2005. 1418 p.

