



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DE LA AMPLIACIÓN
DE LA SUBESTACIÓN DE TRANSFORMACIÓN INCIENSO -GIS- 230/69 KV DE 300 MVA EN
CONFIGURACIÓN INTERRUPTOR Y MEDIO MÁS DOBLE BARRA**

Winstong Estuardo Osorio Chacón

Asesorado por el MSc. Ing. José Rafael Argueta Monterroso

Guatemala, julio de 2018

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	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

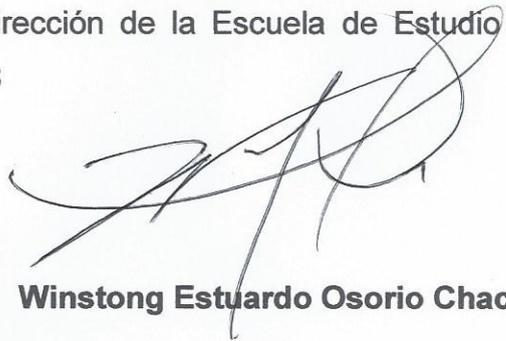
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DE LA AMPLIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN DE TRANSFORMACIÓN INCIENSO -GIS- 230/69 KV DE 300 MVA EN CONFIGURACIÓN INTERRUPTOR Y MEDIO MÁS DOBLE BARRA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudio de Postgrado, con fecha 10 de junio de 2018



Winstong Estuardo Osorio Chacón

Guatemala, 13 de junio de 2018.

Director
Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería 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 **Winstong Estuardo Osorio Chacón** carné número **201020201**, quien optó 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,



"Id y Enseñad a Todos"

José Rafael Argueta Monterroso
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 2913

MSc. José Rafael Argueta Monterroso

Asesor (a)

José Rafael Argueta Monterroso
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 2913

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.

Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

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

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos

Director

Escuela de Estudios de Postgrado



Cc archivo/LZ.LA.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación 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.



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 INVESTIGACIÓN DE LA EVALUACIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DE LA AMPLIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN DE TRANSFORMACIÓN INCIENSO (GIS) 230/69 KV de 300 MVA EN CONFIGURACIÓN INTERRUPTOR Y MEDIO MÁS DOBLE BARRA.** presentado por el estudiante universitario WINSTONG ESTUARDO OSORIO CHACÓN 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.

LIBRE ACCESO Y ENSEÑANZA A TODOS

Ing. Otto Fernando Andrino González
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

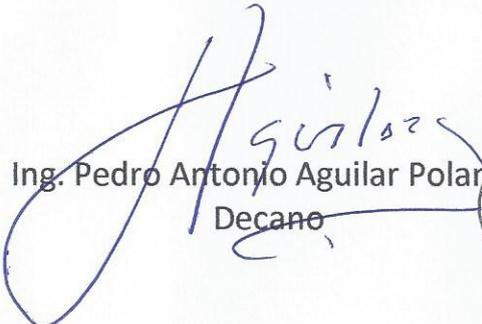


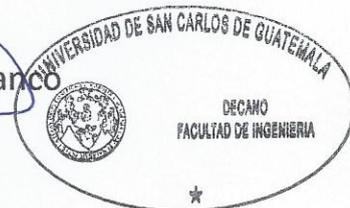


DTG. 258.2018

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 Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DE LA AMPLIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN DE TRANSFORMACIÓN INCIENSO -GIS- 230/69 KV DE 300 MVA EN CONFIGURACIÓN INTERRUPTOR Y MEDIO MÁS DOBLE BARRA**, presentado por el estudiante universitario: **Winstong Estuardo Osorio Chacón**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, julio de 2018

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por haberme otorgado inteligencia, juicio y sabiduría para culminar mi meta.
- Mi madre** Gloria Maricel, por tu amor incondicional a lo largo de mi vida y del desarrollo de mi carrera, por confiar y creer en mí siempre.
- Mis hermanos** Maricel, Jorge y Christian, por llenar mi vida de alegría y permitirme ayudar en su camino
- Mi abuela** Milagro (q. e. p. d.), por haberme dado tanto amor.
- Mi novia** Alejandra, por apoyarme en tantos momentos dándome amor y felicidad a mi vida

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios que me permitió el privilegio de una carrera profesional.

Facultad de Ingeniería

Por el invaluable conocimiento que día con día me acompaña y guía.

Mi asesor

Rafael Argueta, por sus consejos y guía para la elaboración de este trabajo

TRELEC, S.A.

Por permitirme ser el campo donde desarrollo mis conocimientos y facilitarme ayuda para elaborar el presente trabajo.

Mis amigos

Porque nunca faltaron para celebrar las victorias y brindar apoyo en las derrotas, su compañía me dio alegría en este viaje.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. ANTECEDENTES	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. ALCANCES.....	15
5. MARCO TEÓRICO.....	17
5.1. Sistemas de transporte de energía eléctrica	17
5.2. Transportistas y su participación en el mercado.....	18
5.2.1. Acuerdo entre partes	19
5.2.2. Canon	19
5.2.3. Costo anual de transporte.....	20
5.3. Subestaciones eléctricas de potencia	20
5.3.1. De acuerdo con el tipo de función	22
5.3.2. De acuerdo con la potencia y nivel de tensión.....	23
5.3.3. Equipos de alta tensión	24

5.3.4.	Equipos de transformación y compensación	25
5.4.	Configuración de operación de las subestaciones	26
5.4.1.	Arreglo barra simple	26
5.4.2.	Arreglo barra simple más barra de transferencia	27
5.4.3.	Arreglo doble barra.....	28
5.4.4.	Arreglo anillo	28
5.4.5.	Arreglo interruptor y medio	29
5.5.	Estudios eléctricos	30
5.5.1.	Estudios de flujos de carga	30
5.5.2.	Estudios de cortocircuito	33
5.6.	Subestaciones aisladas en gas GIS.....	34
5.7.	La evaluación ambiental.....	36
6.	ÍNDICE PROPUESTO	37
7.	METODOLOGÍA	41
7.1.	Fase 1	41
7.2.	Fase 2	41
7.3.	Fase 3	42
8.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	47
9.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	49
10.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	51
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Unifilar configuración previa de Subestación Incienso	6
2.	Unifilar 69 Kv barra doble Subestación Incienso	7
3.	Unifilar 230 Kv interruptor y medio Subestación Incienso	8
4.	Mercado eléctrico	17
5.	Subestación eléctrica 230/13.8 kV	21
6.	Fragmento de unifilar barra simple	27
7.	Fragmento de unifilar barra simple más barra de transferencia	27
8.	Fragmento de unifilar doble barra	28
9.	Fragmento de unifilar anillo	29
10.	Fragmento de unifilar interruptor y medio	29
11.	Ejemplo de flujo de cargas con software NEPLAN	31
12.	Corte sección bahía GIS 69 kV arreglo tripolar, configuración doble barra y alimentada por cables subterráneos. Modelo Siemens 8DN8	35
13.	Comparativa de requerimientos de espacio AIS versus GIS relación 50:1	35
14.	Metodología ilustrada, fase 1	43
15.	Metodología ilustrada, fase 2	44
16.	Metodología ilustrada, fase 3	45

TABLAS

I.	Cronograma de actividades de periodicidad semanal	49
II.	Recursos, disponibilidad y obtención.....	51
III.	Costos de realización.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
Bar	Bar
kg	Kilogramo
km	Kilometro
kV	Kilovoltio
kWh	Kilovatio hora
MW	Megavatio
MVA	Megavoltioamperio
Q	Quetzal, moneda de Guatemala
PU	Valor por unidad

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista, entidad privada cuya función es coordinar las transacciones de los participantes del mercado mayorista de electricidad en Guatemala; así también, se encarga supervisar la calidad y seguridad del suministro de energía a la red.
Análisis de contingencia	Análisis probabilístico utilizado para predecir los valores de voltaje y corriente que se distribuyen en la red, durante fallas en el sistema, así como conexiones y desconexiones de líneas de transmisión.
Análisis de flujo potencia	Análisis nodal de las condiciones de la red eléctrica de transporte, en donde se analizan las magnitudes de potencia, según los valores de los activos conectados a la red, líneas de transmisión y subestaciones.
CAT	Costo anual de transmisión
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Es el órgano técnico del estado encargado de hacer cumplir la Ley General de Electricidad y su normativa derivada.

GIS	Subestación eléctrica encapsulada aislada con gas.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
NePLAN	Herramienta de simulación de redes eléctricas por computadora.
Peaje	Pago devengado a las empresas transportistas de energía, este corresponde al permiso otorgado para utilizar las instalaciones para suministro de energía, por parte de terceros.
PET	Plan de Expansión del Sistema de Transporte .
TRELEC	Transportista Eléctrica Centroamericana, S.A.
TRECSA	Transportadora de Energía de Centroamérica, S.A.
SF₆	Hexafluoruro de azufre.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
VAD	Es la metodología para definir el precio derivado de prestar el servicio de distribución de energía eléctrica.

RESUMEN

Derivado de las necesidades de crecimiento que experimenta la red de transporte de Guatemala, como consecuencia del crecimiento de la demanda de los usuarios finales y grandes usuarios, han surgido diversos planes de expansión de la red de transporte impulsados y lanzados a licitación, por el Ministerio de Energía y Minas, en los cuales las empresas transportistas de energía participan, según su área de influencia.

Estos planes de expansión traen consigo modificaciones a la red eléctrica del Sistema Nacional Interconectado dependiendo de la magnitud de los proyectos que forman el conjunto, siendo estos construcciones o ampliaciones de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. La presente investigación traerá a evaluación la ampliación de una subestación eléctrica de maniobra, que se convertirá al tipo transformadora y de maniobras con un incremento en su potencia y capacidad instalada, y con la implementación de una tecnología de aislamiento que hasta el momento sigue siendo novedosa en este país.

La subestación eléctrica Incienso tenía una configuración primitiva y con la implementación de la nueva configuración se hace necesario estudiar los flujos de potencia asociados a la misma así como hacer una evaluación ambiental, debido a los nuevos componentes que esta ampliación trae consigo, además se analizará la inversión en el proyecto a un horizonte conveniente.

OBJETIVOS

General

Evaluar técnica y ambientalmente la implementación y operación de la subestación de transformación y maniobras Incienso (GIS) 230/69 kV en configuración interruptor y medio más doble barra.

Específicos

1. Determinar las condiciones técnicas que actualmente se manejan para la subestación, así como el flujo de carga que soporta.
2. Analizar las condiciones resultantes tras la modificación al Sistema Nacional Interconectado producto de la ampliación de la subestación, mediante análisis de flujo de carga y comparación de datos de estudio previo.
3. Establecer medidas de prevención y mitigación de riesgos potenciales producto de la presencia, manipulación y almacenaje de hexafluoruro de azufre SF₆.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, mediante los planes de expansión de la red eléctrica de transporte, se ha incrementado su infraestructura; el Sistema Nacional Interconectado ha sufrido modificaciones que lo fortalecen, aparecen nuevas subestaciones eléctricas y líneas de transmisión que sirven a que todo esto tenga lugar. Cada uno de los proyectos que componen esta expansión representan fuertes inversiones y los beneficios de su funcionamiento son calculados antes de que estos tengan una operación real o un presupuesto aprobado. Este trabajo de investigación se enfocará principalmente en los escenarios técnicos y ambientales, para ello tiene apartados que aborden su funcionamiento económico.

Se comienza analizando la implementación y puesta en operación comercial de una subestación aislada en gas SF₆ (GIS) en Guatemala, la misma representa un largo desarrollo de ingeniería, en donde se analizan los flujos de carga; la selectividad de operación y la confiabilidad que aporte al sistema, dicha implementación requiere de una alta inversión inicial, para la cual la Comisión Nacional de Energía Eléctrica – CNEE-, no tiene establecido en la Ley General de Electricidad que se puedan utilizar este tipo de tecnologías. Esto trae como consecuencia adversa, que los inversionistas no muestren interés en este tipo de proyectos, debido a que el CAT (Costo Anual de Transmisión) que recibirán, será exactamente igual al CAT recibido si realizarían la subestación con tecnología convencional. Por lo que recuperarán su inversión en un tiempo más prolongado, haciendo muy poco atractivo los proyectos de inversión.

Debido a la situación mencionada aparece la necesidad de realizar una justificación técnica económica, para que la CNEE, en un horizonte no muy lejano modifique la legislación, así utilizar esta tecnología sea más viable económicamente.

Además, existe el inconveniente de la tecnología GIS utiliza para aislar las subestaciones encapsuladas uno de los gases de efecto invernadero, que puede suponer un alto grado de contaminación al ambiente si este no es manejado adecuadamente; por lo anterior, esta investigación abarca las medidas de mitigación, el manejo, y la correcta utilización para no afectar el ambiente.

El capítulo dos describirá la condición previa a la implementación del proyecto, como la configuración de la subestación previa, su tecnología, el flujo de carga que transita en ella, las condiciones de la zona y el nivel de importancia de la misma, entre otras.

El capítulo tres comenzará describiendo las características del equipo a instalar de tecnología Gas Insulated Switchgear (GIS), hace énfasis en la cantidad de elementos que la componen y las configuraciones seleccionadas para los niveles de voltaje, siendo interruptor y medio para 230 kV y doble barra para 69 kV y describiendo también las características eléctricas en las cuales están dimensionadas las distintas bahías. Es en este capítulo donde se presentarán los datos obtenidos de la operación de la subestación y su posterior análisis de flujos para distintas contingencias, por ejemplo, se analizará que la subestación entrará en operación sin tener la totalidad de bahías de 230 kV por falta de líneas de transmisión, o el caso en que no se habiliten los campos de transformación de 150 MVA cada uno, estos y otros casos serán objeto de análisis.

En el capítulo cuatro, será puesto a análisis los riesgos ambientales que amenazan el proyecto, también se presentará el plan de contingencias ante los peligros que el hexafluoruro de azufre (SF_6) representa para el medio ambiente, basándose en las normativas y tratados internacionales para gases de efecto invernadero.

En el capítulo cinco, será presenta un análisis financiero enfocado al retorno del capital invertido para la ejecución del proyecto hacia un horizonte establecido, según la recaudación que la subestación tenga por concepto de Costo Anual de Transmisión (CAT).

El capítulo seis, presentará los resultados de los capítulos anteriores, y de los datos presentados se elaborarán las conclusiones y recomendaciones pertinentes al caso, de modo que esta información permita un correcto entendimiento de la operativa de la subestación y el entorno de la misma.

1. ANTECEDENTES

Las subestaciones encapsuladas en gas –GIS- se consolidan en la minería chilena: Algunos de los principales atributos es que son subestaciones compactas que, al instalarse en locaciones ubicadas a gran altura; estos conllevan a una significativa reducción en el montaje del equipo y de la obra civil que lo cimienta, en comparación con las subestaciones aisladas en aire del tipo convencional. Lleva varios años que su aplicación es un estándar en las redes eléctricas de alta tensión de Europa. Esto trae consigo que diversos fabricantes hayan consolidado fuertemente el uso de la tecnología Gas Insulated Switchgear –GIS- en el mercado de la minería en Chile, promoviendo exitosos proyectos. Las subestaciones encapsuladas GIS de alta tensión van desde los 66 kV hasta los 500 kV. En Chile, la empresa Siemens ha suministrado 57 bahías desde 1985, año en que se introdujeron al mercado para el suministro eléctrico a la minera estatal Codelco desde la central termoeléctrica Tocopilla. De la cantidad antes mencionada, el 58 % están instaladas en plantas mineras, ubicadas a gran altura, 35 % en generadoras termoeléctricas e hidroeléctricas y 7 % en plantas refinadoras de petróleo. (Energy Siemens, 2011)

Presencia de proyectos en Perú: Las bahías aisladas en gas están siendo suministradas en el proyecto de ampliación de la Central Hidroeléctrica de Machu Picchu, donde se construyó una subestación bajo tierra, donde se alojaron los transformadores de potencia y, en segundo nivel, la GIS de configuración barra simple en 138 kV. También se están suministrando bahías GIS en la Central Hidroeléctrica Chéves, en 220 kV, aplicándose la misma configuración que en Machu Picchu: los transformadores de potencia en un

primer nivel y las bahías en la parte superior. En los proyectos mencionados se eligieron las bahías GIS como la solución más acertada como consecuencia del reducido espacio destinado a instalar subestaciones eléctricas convencionales del tipo aislado en aire. Se necesitaba transmitir energía y llevarla a otro lugar a varios kilómetros y para eso se transformaba a 138kV o 220kV. El impacto ambiental fue nulo, porque no se tuvo que alterar ningún ecosistema ni realizar modificar cerros colindantes. Además, las GIS tienen la facilidad de ser modulares. (Camahuali, 2013)

Migrar de la tecnología Air Insulated Switchgear –AIS- hacia Gas Insulated Switchgear –GIS-: Las dimensiones y la magnitud de la red eléctrica de transmisión para las grandes ciudades y estados o municipios debe ser planificada y dimensionada con muchos años de anticipación y desarrollada a medida que crece, para satisfacer la necesidad de energía de su población y sostener de manera constante el desarrollo industrial. Consecuente a esa planificación, se construyen subestaciones de transformación dentro de las zonas urbanas que fueron antes poco pobladas o que no se tenía previsto que a mediano plazo tuvieran un crecimiento considerable. Para el caso de Guatemala, es evidente que la distribución de construcciones en la ciudad no fue planificada hacia un horizonte lejano sino que se pensó en que no creceríamos tanto como ciudad. (Ardila & Ardila, 2011)

Cuando se da un crecimiento que no es previsto o controlado de la red, las subestaciones que son de importancia enorme para el funcionamiento del sistema eléctrico de las ciudades, están hoy ubicadas en zonas de gran desarrollo comercial, industrial o habitacional, en otras palabras, han quedado atrapadas en medio de núcleos de viviendas o industrias, deteniendo el crecimiento de la zona y convirtiéndose en un impedimento para la expansión urbanística de las ciudades. (Gomez & Vargas, 2011)

En diversas metrópolis europeas, se ha demostrado contundentemente que la solución más viable para la problemática de estas instalaciones está en la compactación de la subestación, es decir, construir una subestación nueva tipo GIS, que usa la tecnología de aislamiento en hexafluoruro de azufre SF₆ e implantarla en el interior de un edificio, debajo de un parque o porción habitacional, mejora así las prestaciones técnicas actuales y consiguiendo una importante reducción del espacio a utilizar. Una de las ventajas que se consideran atractivas mientras se realizan este tipo de proyectos es que el terreno libre que queda arriba o a los costados tiene un alto valor económico, este puede ser utilizado para continuar con la urbanización del sector. Al construir una subestación tipo GIS, se logran importantes mejoras en la confiabilidad del sistema eléctrico que van desde el incremento del número de bahías de línea, la adición de nuevos equipos, la reducción al mínimo del mantenimiento hasta lograr una mayor continuidad de servicio y seguridad. (ABB, 2013)

Cuando se construye subestación con tecnología Gas Insulated Switchgear (GIS), se espera que el indicador que más peso tenga en la aprobación del proyecto sea la confiabilidad que se puede obtener en la red al modificarla y añadiendo valor a la seguridad de la instalación. Se espera entonces mostrar una alternativa para que las empresas de transporte de energía y las instituciones gubernamentales tengan en cuenta los beneficios y las remuneraciones que se logran mejorando el crecimiento urbanístico de la ciudad. (Ardila & Ardila, 2011)

Hexafluoruro de Azufre (SF₆) composición y riesgos: El calentamiento global es la incapacidad del planeta de reflejar la radiación solar incidente hacia el espacio exterior; esto es consecuencia de la acumulación de gases de efecto invernadero sobre la capa de ozono del planeta, al quedar atrapada la radiación

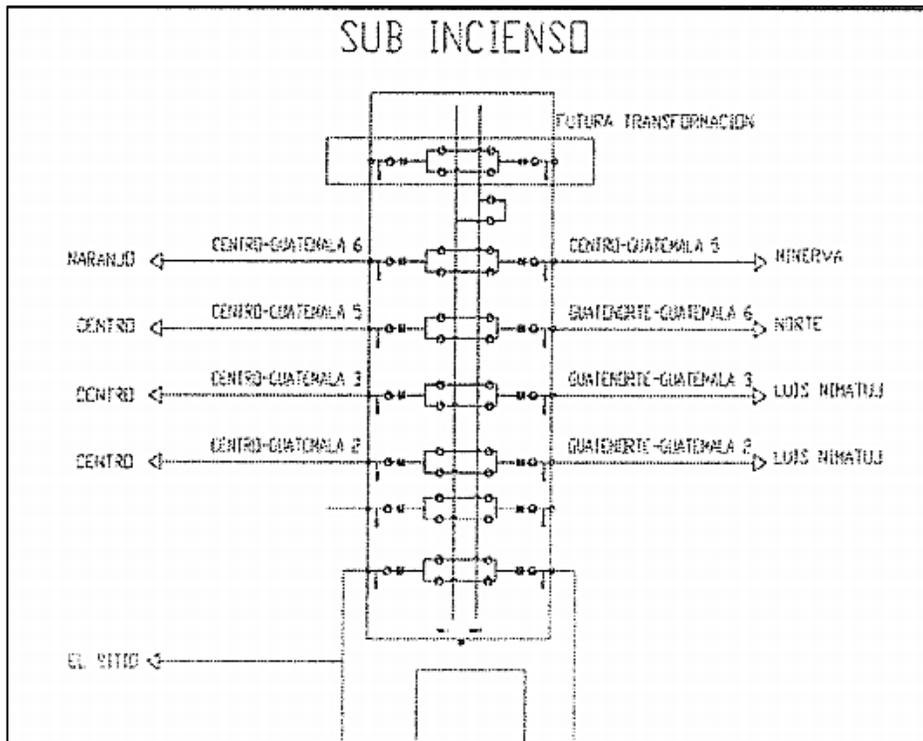
esta altera las condiciones climáticas del planeta de diferentes formas, las cuales tienen graves consecuencias en nuestros ecosistemas alterando así el nivel de vida de la humanidad. Como consecuencia, esto es una etapa de emergencia global en la cual ya existen convenios internacionales que obligan a las grandes industrias a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero que estén relacionados con su actividad económica. (Parlamento Europeo, 2006)

El hexafluoruro de azufre (SF_6) es un gas que se ha utilizado desde los años 1960 en equipos de transporte y distribución de energía eléctrica que sobrepasan los 1 000 voltios. Sus características físicas y químicas especiales hacen que sea ideal para su uso en aplicaciones de conmutación, seccionamiento y aislamiento. El SF_6 tiene un potencial de calentamiento global de 22 200, por lo que debe ser utilizado solamente en sistemas presurizados tales como interruptores de potencia. Tras su utilización, es posible seguir un programa de reciclado, como por ejemplo, la reutilización, para evitar al máximo las emisiones a la atmósfera. El SF_6 es un gas aislante no inflamable y no tóxico, aunque afecta en menor medida a la capa de ozono, tiene un alto potencial de efecto invernadero. Debido a esto, el SF_6 es uno de los gases de efecto invernadero regulados por el Protocolo de Kioto. Estos gases tras ser liberados a la atmósfera, impiden que la radiación infrarroja de onda larga emitida por la superficie de la tierra salga al espacio exterior quedando atrapada entre nosotros, comportándose como las paredes de los invernaderos, provocando calentamiento en el aire interior. Entre los gases naturales de efecto invernadero están el dióxido de carbono, el ozono, el vapor de agua, óxidos de nitrógeno y el metano y los gases de efecto invernadero creados por el hombre son los HFC, PFC, CFC y el SF_6 . (ZVEI - Zentrainverband Elektrotechnik und elektronische Industrie, 2012)

Para controlar las emisiones del SF₆ y de sus productos de descomposición se empleará un detector, mediante la revisión de las juntas, llaves, y tomas de gas de los compartimientos se detectarán fugas mediante uso indicadores de sonido; por otro lado, se hará una toma de datos de la presión de gas para calcular el volumen contenido y comparar con la cantidad inicial introducida. Con esta información, los volúmenes de gases emitidos se miden en su equivalente en CO₂, y se ponderan de acuerdo a su potencial de calentamiento global. Los resultados se verán reflejados como índices de la huella de carbono, por ejemplo, que una reducción de una tonelada de SF₆ equivale a reducir 22.200 toneladas de CO₂, de igual manera se puede hacer este símil con cualquier gas de efecto invernadero (Parlamento Europeo, 2006)

Subestación Incienso y su estado previo al proyecto de ampliación: Como antecedente, se muestra también la configuración anterior de la subestación, en donde se muestra una subestación de maniobra, doble barra, aislada en aire y de alto perfil, con 10 bahías de línea de las cuales una esta partida en dirección a la misma subestación, pero con función de alimentador doble hacia San Juan de Dios y el resto como en configuración normal, es importante mencionar que las bahías de línea no contaban con elementos de protección como interruptores de potencia en varias bahías; además de que no al no contar con interruptores de potencia se carecía de protecciones de líneas establecidas que pueden ser controladas, mediante relés de protección.

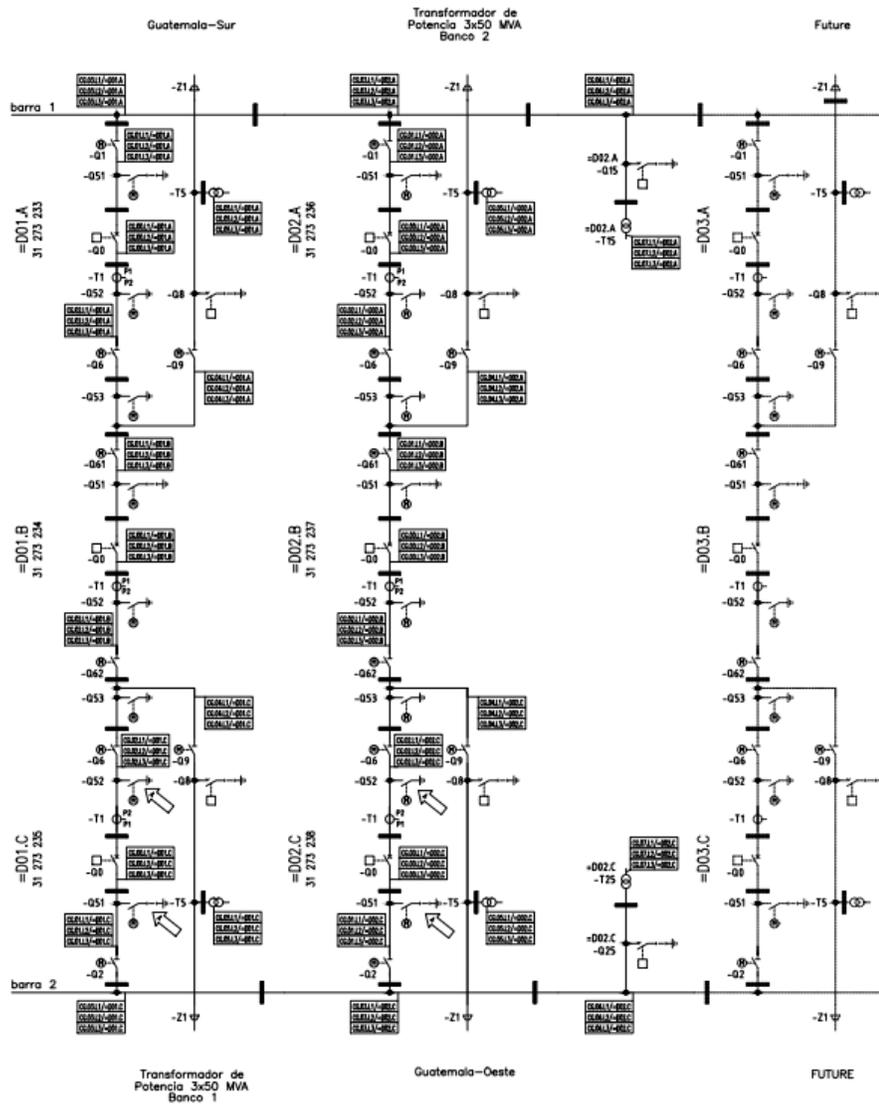
Figura 1. Unifilar configuración previa de Subestación Incienso



Fuente: CNEE.

Ahora bien, se presenta el nuevo unifilar para la ampliación de la subestación, siendo estos dos, uno para cada nivel de voltaje, en el unifilar 230 kV todavía se contemplaba la conexión con Guate Oeste; sin embargo, más adelante se hablará que será por medio de Guate Norte, debido a problemas que tiene otra transportista en la construcción de la subestación Guate Oeste y las líneas de transmisión:

Figura 3. Unifilar 230 Kv interruptor y medio Subestación Incienco



Fuente: SIEMENS AG

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa Transportista Eléctrica Centroamericana, S.A -TRELEC-, propuso en el año 2012, participar en el Plan de Expansión de la Transmisión-PET 2014-2023; esta tendría como objetivo mejorar la confiabilidad, selectividad y la seguridad operativa de la red de 230 y 69 kV, para ofrecer un mejor servicio a la empresa distribuidora de la corporación EEGSA, así como usuarios privados, los cuales están conectados a la red de TRELEC y realicen actividades comerciales mediante la compra y venta de bloques de energía.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica aprobó dichos proyectos en la resolución CNEE 197 2013; en estas resoluciones de la comisión para lograr la aprobación de las mismas TRELEC presentó diversos estudios eléctricos que respaldaban la viabilidad del mismo; sin embargo, tras la puesta en operación se desea obtener datos reales. En términos generales, se desea conocer los flujos de potencia asociados a la nueva configuración de la subestación, una comparación de lo estimado en los estudios contra el comportamiento real de la misma, haciendo también un análisis del retorno de inversión y de las consideraciones ambientales que conlleva el proyecto, la respuesta a esta pregunta dirá si la operación de esta nueva subestación es factible.

Para abordar la situación actual de la subestación, según su configuración, construcción, cantidad de bahías, cobro de CAT. Esta es una toma de datos que se hará en campo y con datos que se entreguen a la Comisión que servirán como punto de arranque y comparación de lo actual contra la nueva configuración.

Lo siguiente será abordar la tarea más importante del presente trabajo en la cual se someterá a análisis, la tecnología GIS contra AIS, los flujos de potencia resultantes de la modificación al SIN, la alimentación de 300 MVA de transformación por medio de líneas 230 kV y la adición de más bahías de 69 kV a la configuración existente. Se traerán a discusión y comparación los datos de las instalaciones anteriores y los estudios preliminares que dieron paso al proyecto, para posteriormente medir el impacto de la nueva subestación y formar un criterio que nos permita dictaminar la factibilidad de la misma.

La tecnología GIS trae consigo la utilización de un gas de efecto invernadero para el aislamiento de toda la subestación y para la extinción de arco, si bien esta es una tecnología muy moderna que maneja el gas, de una manera muy segura existe el riesgo potencial de contar con un número considerable de toneladas del mismo. La investigación de los riesgos llevará a la determinación de alternativas que permitan la mitigación del riesgo ante fallas, lo cual puede devenir en exposición a personal humano como la liberación del gas a la atmosfera, todo esto, según las medidas adoptadas debe reducir el riesgo al mínimo y garantizar la integridad del medio ambiente.

- Preguntas de investigación
 - Pregunta general:
 - ¿Qué justificación técnico, económico y ambiental se espera para cambiar la configuración actual de la subestación Incienso 69 kV a configuración GIS 230/69 kV de 300 MVA en configuración interruptor y medio más doble barra?

- Preguntas específicas:
 - ¿Cuál es la situación actual del área de influencia cercana a la subestación Incienso 69 kV?
 - ¿Cuál será el impacto en el Sistema Nacional Interconectado la instalación de 300 MVA de capacidad de transformación y la llegada de dos líneas de transmisión que lo alimentan, basados en los flujos de potencia resultantes?
 - ¿Qué consideraciones y medidas ambientales fuera de lo convencional traerá la implementación de la tecnología GIS para este proyecto, debido a la presencia del SF₆?
- Delimitación del problema:

Esta investigación se delimita espacialmente a la subestación eléctrica Incienso como parte del Sistema Nacional Interconectado, tras ser realizada dentro de un horizonte de tiempo de dos meses. Su contenido incluirá análisis del sistema de potencia en el que se encuentra la subestación y los fenómenos eléctricos asociados a la investigación de los flujos de potencia; también analizará el retorno de inversión a una temporalidad de 30 años, y por último, el impacto ambiental que representa el proyecto dentro de su ubicación geográfica.

3. JUSTIFICACIÓN

El presente anteproyecto pertenece a la línea de trabajo de Formulación, Gestión, Seguimiento y Evaluación de Proyectos Energéticos, la cual contiene el área de interés criterios de evaluación de proyectos, evaluación de proyectos de inversión, preparación, formulación y evaluar un proyecto.

Todas las modificaciones a la red de transporte del Sistema Nacional Interconectado (SNI), conllevan a la realización de estudios de carácter técnico, económico y ambiental para justificar la viabilidad del proyecto en mención. En el caso de esta investigación, el proyecto será la ampliación de una subestación existente llamada Incienso, esta cambiará de configuración, potencia y sobretodo de tecnología para operar.

La subestación Incienso 230/69 kV, se encuentra ubicada a un costado del puente El Incienso en el Anillo Periférico de la ciudad, al tener una capacidad de potencia de 300 MVA, se convierte en un importante nodo dentro de la red. Lo anterior conlleva a que la continuidad y la calidad del suministro, debe de encontrarse en óptimas condiciones. La ampliación de dicha subestación generará un impacto muy grande dentro del ámbito ya que es la primera dentro de la red de transporte de TRELEC en usar la tecnología GIS y sumada a eso, la gran cantidad líneas de transmisión que estarán conectadas.

Este estudio tiene como propósito demostrar técnica, económicamente, y ambientalmente que la ampliación de la subestación a configuración interruptor y medio (230 kV) y doble barra (69 kV) en tecnología aislada en gas GIS con capacidad de transformación de 300 MVA, no solo mejorará las condiciones

actuales del servicio de energía eléctrica de la región, sino que también la empresa TRELEC recibirá un pago anual por la implementación del proyecto, de acuerdo a los equipos que se instalarán utilizando esta tecnología, sumado a lo anterior, se desea evidenciar el impacto ambiental de dicho proyecto.

El presente estudio pretende servir de guía para la evaluación de futuros proyectos, para justificar inversiones puntuales, y para este trabajo de graduación se seleccionó un proyecto con un alto impacto dentro de la red que se espera traiga beneficios a muchos sectores de la capital.

4. ALCANCES

Esta investigación será de carácter explicativa, puesto que se busca encontrar una justificación técnica y económica para que se apruebe un proyecto de ampliación a la capacidad de transporte. Se busca describir el área de influencia del proyecto, así como los equipos principales que se utilizarían en la subestación y se explicarán los resultados de la investigación, mediante el análisis de las variables propuestas.

Se realizarán estudios económicos, análisis ambiental y principalmente estudios eléctricos de flujos de carga, para conocer el comportamiento de la red eléctrica, para evaluar el impacto de este nuevo elemento a la red de transporte.

Se busca, utilizando como instrumento esta investigación justificar el por qué al realizar este proyecto en configuración interruptor y medio más doble barra utilizando la tecnología GIS, se mejoraría la seguridad operativa y cuáles serán los beneficios técnicos y económicos.

En el sector eléctrico serán beneficiadas los siguientes participantes, descritos a continuación:

- Transportista Eléctrica Centroamérica, S.A.: será el principal beneficiario, debido a que será el encargado de realizar todas las inversiones necesarias para que la subestación eléctrica se encuentre operando. A partir de este momento empieza a recibir la remuneración anual para recuperar su inversión, así como gozar de mayor seguridad y estabilidad

en su red, siendo esta la red encargada de abastecer a la ciudad capital de suministro eléctrico.

- El municipio de Guatemala: serán los beneficiarios directos del proyecto, debido a que, tras la implementación del proyecto, se espera que la calidad del suministro incremente, adicional los costos de la energía eléctrica para los usuarios serán los mismos que brinda la Comisión Eléctrica.
- Profesionales o entidades gubernamentales que deseen evaluar proyectos de inversión, cuyo objetivo sea realizar ampliaciones o mejoras al SNI deseando conocer el impacto que estos cambios provoquen a la red eléctrica de transporte

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Sistemas de transporte de energía eléctrica

El transporte de energía eléctrica es una de las cuatro partes principales que conforman el mercado de eléctrico en cualquier matriz energética, es el punto de encuentro entre la generación y la demanda, es además, el medio a través del cual se realizan los intercambios de energía eléctrica (Interconexión Eléctrica, S.A. E.S.P ISA, 2016). Los cuatro partes que conforman el mercado eléctrico son:

- La generación
- El transporte
- La distribución
- La comercialización

Figura 4. Mercado eléctrico



Fuente: *Sistema eléctrico*. <http://www.eoi.es/blogs/merme/files/2015/11/Sistema-elctrico.jpg>.

Consulta: 15 de octubre de 2017.

Un sistema de transporte involucra todos aquellos componentes que permiten la interconexión eléctrica entre dos elementos que conforman el mercado eléctrico. Este se divide en subestaciones eléctricas y líneas de transmisión ya sean en niveles de transmisión y sub transmisión.

Está conformado por un sistema principal y sistemas secundarios: el sistema principal es el aquel que se encuentra compartido por los generadores, por otro lado, los sistemas secundarios no todos aquellos sistemas que no forman parte del sistema principal. Para conocer si es capaz de ingresar como parte del sistema principal, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica deberá aprobar por medio de una resolución la inclusión de un elemento al sistema (CNEE, Ley General de Electricidad, 2016).

Existen tres tipos de subestaciones, las cuales serán descritas más adelante, la función principal de estas es de concentrar los flujos de potencia eléctrica, a través de varios puntos. Para el caso de las líneas de transmisión, estas se utilizan para transmitir energía eléctrica y señales de un punto a otro; específicamente desde una fuente hasta una carga (William H. Hayt, 2012).

5.2. Transportistas y su participación en el mercado

Las empresas que se encargan de realizar las obras de construcción, operación y mantenimientos de los sistemas de transporte de energía eléctrica son llamados: transportistas. Estas empresas reciben una remuneración por tener las instalaciones de transporte en óptimas condiciones.

Existen tres maneras para que las empresas transportistas reciban remuneración o pago por peaje por tener sus instalaciones en operación: Por acuerdo entre partes, por Canon y por CAT

5.2.1. Acuerdo entre partes

Se da cuando una empresa de alto consumo de energía (gran usuario) o un generador quieren conectarse a la red de transporte, se define un contrato en el cual el gran usuario acuerda con la transportista un pago por uso y mantenimiento de sus instalaciones para que el servicio de transmisión de potencia eléctrica no se vea afectado, ya sea por interrupciones o fallas. Por lo que el transportista le define al gran usuario, la cantidad de equipos e instalaciones que serán necesarios para lograr esta conexión y define a su vez una cantidad de dinero que serán pagadas por el gran usuario, a través de transacciones con el Administrador del Mercado Mayorista (AMM). (CNEE, Ley General de Electricidad, 2016).

5.2.2. Canon

Generalmente, los proyectos de expansión del sistema de transporte de energía, son sacados a licitación abierta por organismos del gobierno, esto se debe a que son proyectos de gran magnitud y para mantener la transparencia de los mismos es el gobierno mismo quién se encarga de adjudicarlos porque se habla de dinero del Estado. Para este caso, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) es el encargado de administrar estas licitaciones y velar por que las empresas que oferten este tipo de proyectos, presenten y declaren la manera en la cual serán financiados sus activos y el modo de operación de los mismos. Al momento de una empresa gana el proyecto, define con el MEM la forma en la cual se le pagará por mantener sus activos en operación, y esta forma de pago es denominada Canon, o, en otras palabras, es la cantidad de dinero que recibe una empresa por el alquiler de sus instalaciones en beneficio de la red de transporte de energía.

5.2.3. Costo anual de transporte

El CAT es el peaje definido por la CNEE, que se paga a las empresas transportistas por incluir un nuevo elemento a su red principal o secundaria. El peaje es definido como: el pago que recibe el propietario de las instalaciones y activos de transmisión, transformación o distribución por permitir el uso de dichas instalaciones para el transporte de energía eléctrica por parte de terceros. (CNEE, CNEE, 2016). Este peaje depende de la configuración de las instalaciones, así como del tipo de activos que estas posean. Para lo cual la CNEE solicita a las empresas transportistas un análisis económico para justificar el pago por los activos, adicional se aporta un extra por la realización de los mantenimientos a los equipos. (CNEE, Ley General de Electricidad, 2016)

5.3. Subestaciones eléctricas de potencia

Una subestación eléctrica es la representación física de un nodo en el sistema eléctrico de potencia, esta se encarga de transformar la energía eléctrica a niveles adecuados de tensión para sus diferentes usos: transporte, distribución o consumo, así como también, direccionar los flujos donde sea necesario (Villegas, 1991). Están construidas por un conjunto de equipos de potencia, medición, control y protección con la capacidad de monitorear y controlar el flujo de energía garantizando así la seguridad del sistema. Dicho de otra manera: es el conjunto de dispositivos eléctricos, que forman parte de un sistema eléctrico de potencia, cuyas funciones principales son: transformar voltaje y direccionar circuitos de potencia (Martín, 1987).

Figura 5. **Subestación eléctrica 230/13.8 kV**



Fuente: Subestación Costa Linda, TRELEC.

Las subestaciones básicamente consisten en un número de circuitos que entran y salen de un punto común, denominado barra, dentro de estas el interruptor el principal componente de un circuito y complementándose con los equipos de seccionamiento, transformadores de medida, y pararrayos (Villegas, 1991).

Se pueden clasificar de dos maneras: de acuerdo con el tipo de función que desempeñan o de acuerdo con la potencia y nivel de tensión que manejan las subestaciones, para el propósito de este marco teórico será referenciado a los niveles de tensión que actualmente posee el sistema de transporte de Guatemala.

5.3.1. De acuerdo con el tipo de función

- Subestaciones transformadoras de tensión: son las que contienen uno o más transformadores de potencia, los cuales son capaces de transformar un nivel de tensión alto a un nivel de tensión bajo o viceversa manteniendo el flujo de potencia constante. En Guatemala, la mayoría de subestaciones son de este tipo, estas se pueden encontrar en todos los puntos de la red de transporte, desde la generación de energía (comúnmente 13.8 kV) elevándose a 230 kV, luego reduciéndose a un nivel de tensión de 69 kV, para ser entregada a los puntos de distribución a un nivel de tensión de 13.8 kV.
- Subestaciones de maniobra o switcheo: son subestaciones que se utilizan para realizar maniobras o cambios de sentido en los flujos de potencia. En altos nivel de tensión es necesario que siempre que se necesite realizar una apertura a la línea de transmisión para conectar, ya se otra carga o un generador, que se construya una subestación de este tipo para poder realizar las maniobras necesarias y mantener la seguridad del sistema.
- Subestaciones mixtas: son una mezcla de las dos subestaciones mencionadas anteriormente. Poseen circuitos de maniobras y adicional poseen uno o varios circuitos dedicados a la conexión con el transformador de potencia. (Martín, 1987).

5.3.2. De acuerdo con la potencia y nivel de tensión

- Subestaciones de transmisión (arriba de 230 kV): En Guatemala, el sistema principal se encuentra conformado por una red de transmisión de 230 kV y la interconexión con México en 400 kV.
- Subestaciones de subtransmisión (Entre 230 kV y 115 kV): Son subestaciones que, por lo general se encuentran en el interior del país, ya que son desatendidas y al recorrer grandes distancias, se hace necesario que la caída de tensión del punto de generación hacia el consumo sea el menor posible. En Guatemala, se maneja una red de transporte que posee un nivel de tensión de 138 kV. (CNEE, 2014)
- Subestaciones de distribución primaria (Entre 115 kV y 23 kV): La mayoría de grandes usuarios se encuentran conectados a estos niveles de tensión, ya que les beneficia principalmente por la menor corriente que transcurre a este nivel de tensión, contraria a conectarse a niveles de distribución. Por lo tanto, se ahorran costos en conductores de mayor capacidad y mantenimiento.
- Subestaciones de distribución secundaria (Abajo de 23 kV): La red de distribución de la Empresa Eléctrica de Guatemala-EEGSA-, utiliza un nivel de tensión de 13.8 kV para prestar el servicio a todos los usuarios de los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez y Escuintla. Este nivel de tensión es adecuado para grandes comercios, fábricas y maquilas, así como para transformarlo a nivel de baja tensión para los usuarios domésticos y pequeñas industrias. (CNEE, 2014)

Los equipos que se utilizan en las subestaciones se pueden clasificar en dos grupos: (Villegas, 1991).

5.3.3. Equipos de alta tensión

- **Interruptores de potencia:** Es el equipo principal de los circuitos de las subestaciones, es el encargado de realizar aperturas o cierres de los circuitos bajo carga, es decir, es el capaz de desconectar o conectar de manera segura un circuito teniendo conectado una carga. Esto lo puede realizar gracias a la tecnología que este disponga para interrumpir la generación de un arco eléctrico entre los contactos.
- **Seccionadores:** Son equipos que aíslan secciones de circuitos para mantener con o sin tensión a una parte del circuito. En contraposición a los interruptores de potencia, estos no son capaces de aminorar la generación del arco eléctrico que ocurre durante una apertura de línea con carga.
- **Seccionadores o cuchillas de puesta a tierra:** Cumplen la misma función a los seccionadores, con la particularidad que estos son conectados un extremo al circuito de tensión, mientras el otro extremo se encuentra sólidamente aterrizado a tierra. Su función es de brindar a las falla un camino rápido a tierra para que las corrientes se drenen y no dañen los equipos principales.
- **Transformadores de corriente:** son transformadores que poseen la capacidad de transformar altos niveles de corriente a nivel adecuados, para que estos sean utilizados en equipos de control, medición y protección de la subestación.

- Transformadores de tensión: son transformadores que poseen la capacidad de transformar altos niveles de tensión, a niveles adecuados, para que estos sean utilizados en equipos de control, medición y protección de la subestación.
- Pararrayos: Son equipos que se colocan estratégicamente para brindar un camino más cercano hacia tierra a las descargas atmosféricas, para evitar que los equipos principales alcancen estos extremadamente altos niveles de tensión y corriente y así evitar daños.
- Aisladores: Son cadenas de materiales aislantes que se colocan para mantener las libranzas y distancias mínimas de seguridad entre las partes energizadas y los sitios seguros de movilización de personal.

5.3.4. Equipos de transformación y compensación

- Autotransformadores y transformadores: son los equipos más caros y robustos que poseen las subestaciones, tienen la función de transformar niveles de tensión (disminuir o aumentar) a niveles adecuados para su utilización, con la característica principal de mantener la misma potencia en el lado de alta tensión como en el lado de baja tensión.
- Reactores de línea: se utilizan para compensar la generación de potencia reactiva capacitiva en las líneas de alta tensión generando una componente reactiva con sentido contrario.
- Bancos de capacitores: se utilizan para aumentar el voltaje, debido a la conexión de varias cargas en una red de transmisión que necesite reforzarse. (ABB, 2013)

5.4. Configuración de operación de las subestaciones

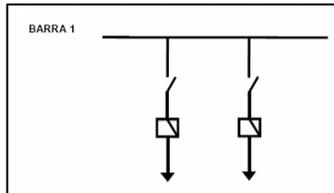
Una configuración es un arreglo de la disposición física los equipos electromecánicos de potencia que se encuentran distribuidos en el patio de la subestación, los cuales pertenecen a un mismo nivel de tensión, es decir, su arreglo respecto a un diagrama unifilar. Este arreglo permite a la subestación diferentes grados de selectividad, confiabilidad y seguridad para realizar maniobras y tener mejor manejo del flujo de energía eléctrica (Villegas, 1991).

Las configuraciones que a continuación se presentarán, estos son aplicables tanto a las tecnologías convencionales como para las subestaciones encapsuladas en SF₆.

5.4.1. Arreglo barra simple

Esta configuración cuenta con un solo juego de barajas colectores para los campos de líneas de transmisión y de transformación, para los cuales se conectan por medio de un interruptor. Esta configuración suele ser la más utilizada por ser económica, sencilla, de fácil protección, ocupa muy poco espacio y no contiene muchas posibilidades de maniobras incorrectas. Posee como desventaja principal la falta de flexibilidad, confiabilidad, y seguridad, ya que cuando se presenta una contingencia o se realiza un trabajo de mantenimiento se tiene que suspender la línea afectada para trabajar de manera segura (Villegas, 1991).

Figura 6. **Fragmento de unifilar barra simple**

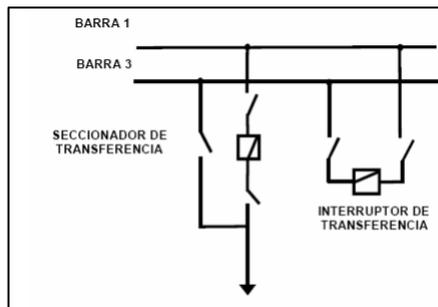


Fuente: elaboración propia.

5.4.2. **Arreglo barra simple más barra de transferencia**

Se utiliza cuando se desea mejorar el factor confiabilidad provocado por la falta de interruptores en la configuración de barra simple. Para ello, a esta configuración se le agrega una barra de transferencia o también llamada auxiliar, mediante un seccionador extra (de transferencia) y un interruptor común, para realizar la conexión a dicha barra y así realizar labores de mantenimiento o despejar fallas en la barra principal manteniendo la continuidad del servicio. (Villegas, 1991)

Figura 7. **Fragmento de unifilar barra simple más barra de transferencia**

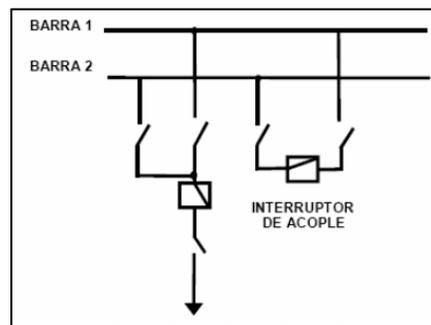


Fuente: elaboración propia.

5.4.3. Arreglo doble barra

Esta configuración es utilizada para aumentar la flexibilidad a la barra simple, esto se realiza por medio de la adición de una segunda barra principal y un interruptor para el acople entre las dos barras. La ventaja principal de esta configuración es la flexibilidad que otorga, pues permite separar líneas en cada una de las barras, permitiendo dividir sistemas (Villegas, 1991). Este tipo de configuración es ideal para sistemas enmallados dada la complejidad de los mismos.

Figura 8. Fragmento de unifilar doble barra

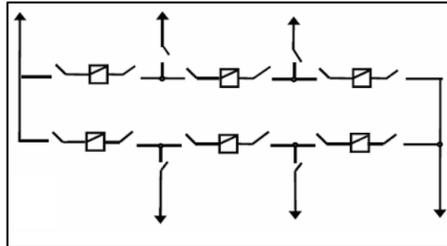


Fuente: elaboración propia.

5.4.4. Arreglo anillo

Esta configuración tiene la particularidad de que no posee un juego de barrajes colector como tal, por lo que la conexión de los circuitos se forma mediante un anillo conformado por interruptores de potencia, colocando los circuitos entre cada dos de ellos. Esta configuración es económica y segura, brindando confiabilidad, pero con la desventaja de que no posee flexibilidad. (Villegas, 1991)

Figura 9. **Fragmento de unifilar anillo**

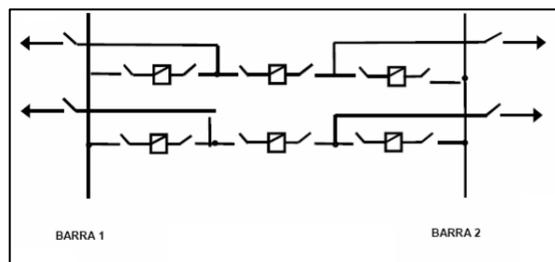


Fuente: elaboración propia.

5.4.5. **Arreglo interruptor y medio**

Es conocido por este nombre debido a que esta configuración exige tres interruptores por cada dos salidas de línea componiendo así diámetros de la subestación. La subestación posee un juego de dos barrajes principales interconectados por medio de tres interruptores conectados en serie con sus respectivos seccionadores. Una gran ventaja de esta configuración es que permite realizar mantenimiento a cualquiera de los juegos de barrajes o a ambos al mismo tiempo sin perder la continuidad del servicio, dando así un alto índice de confiabilidad y de seguridad al sistema. (Villegas, 1991)

Figura 10. **Fragmento de unifilar interruptor y medio**



Fuente: elaboración propia.

5.5. Estudios eléctricos

Los estudios eléctricos son diferentes análisis que se deben realizar para poder solicitar a la CNEE incluir un nuevo elemento a la red de transporte. Por lo general, este ente solicita a las empresas transportistas realizar tres tipos de estudios: Flujos de cargas, cortocircuitos y estudios de estabilidad transitoria.

Estos estudios son especificados en las Normas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte -NEAST-, las cuales tienen como objetivo el de establecer el tipo, contenido y alcance de los estudios eléctricos para adiciones al sistema de potencia, que todo interesado debe presentar ante la CNEE, para toda nueva instalación, o ampliación de la infraestructura existente, de generación, transmisión o distribución de energía eléctrica (CNEE, NEAST, 1998).

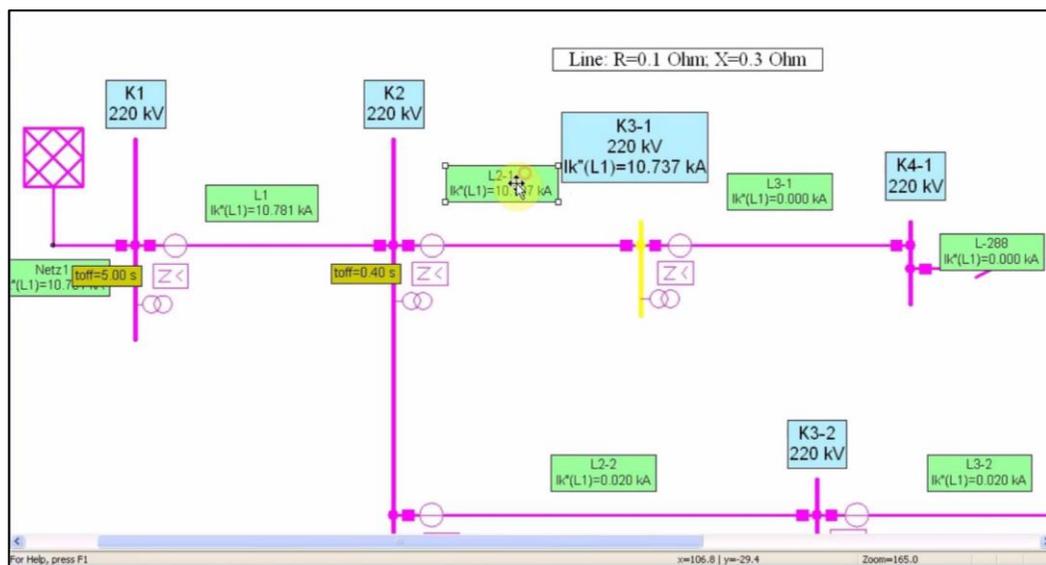
5.5.1. Estudios de flujos de carga

Un estudio de flujo de carga es la determinación de la tensión, intensidad, potencia, factor de potencia y potencias reactivas en varios puntos de una red eléctrica en condiciones normales de operación. Los estudios de cargas son fundamentales en la definición del horizonte futuro del desarrollo del sistema, puesto que del resultado satisfactorio de los resultados del estudio depende del conocimiento de los efectos de la interconexión con otras redes, de las nuevas cargas, de las nuevas centrales generadoras y de las nuevas líneas de transmisión antes de que se instalen, así pues, se pueden tomar decisiones acertadas para el futuro. (Stevenson, 1979)

Los resultados de los estudios de flujo de carga sirven también como punto de partida de los estudios de confiabilidad de sistemas dado que se conocen los siguientes puntos.

- Flujos de potencia activa y reactiva en todas las ramas de la red eléctrica.
- Equipos, circuitos y nodos sobrecargados.
- Es posible simular diferentes condiciones de operación de la red eléctrica.
- Facilidad de localizar el sitio óptimo de los bancos de capacitores, donde se requiera mejorar el factor de potencia.
- Capacidad de determinar la cantidad de taps de los transformadores para la regulación del voltaje entregado a las cargas.

Figura 11. Ejemplo de flujo de cargas con software NEPLAN



Fuente: elaboración propia.

La solución de flujos de cargas, requiere un amplio conocimiento acerca de los parámetros eléctricos de las líneas de transmisión, así como de los tipos de nodos que existen en un sistema de potencia. Estos nodos o también conocidos como barras son:

- Barra de carga: es un tipo de barra en donde no se tiene inyección de generación, por lo que únicamente se conocen la potencia activa y reactiva que estos consumen de la red.
- Barra de voltaje controlado: estas barras son llamadas de esta manera, ya que se encuentran conectados a un generador por lo que la magnitud de su voltaje se mantiene constante. En este tipo de barras se conoce el voltaje y se conoce también la potencia activa que inyecta a la red.
- Barra de compensación: Es la barra que mantiene la estabilidad del sistema eléctrico de potencia, por conveniencia se le asigna un ángulo 0° para tomarlo como referencia.

Conociendo estos conceptos, se utilizan dos métodos numéricos para encontrar los flujos de carga en un sistema de potencia (Grainger, 2002). Estos son: el método de Newton-Raphson, el cual resuelve la forma polar de las ecuaciones de flujos de potencia hasta que los errores ΔP y ΔQ en todas las barras caen dentro de los límites especificados. El otro método en mención es el método de Gauss-Seidel, este resuelve las ecuaciones de flujo de potencia en coordenadas rectangulares hasta que las diferencias en los voltajes de barra de una iteración a otra son lo suficientemente pequeñas. Ambos métodos se basan en las ecuaciones de admitancias de barra. (Grainger, 2002)

La CNEE solicita por medio de las normas NEAST, que los estudios de flujo de carga se deben realizar considerando las condiciones críticas ante la incorporación de las nuevas instalaciones o ampliaciones de generación,

transporte y distribución, para máxima y mínima demanda. Conociendo estos flujos se deberá verificar la existencia o no de sobrecargas en líneas y el cumplimiento de los parámetros eléctricos, así como también, las posibles contingencias que se puedan presentar para ese sistema particular. (CNEE, NEAST, 1998)

5.5.2. Estudios de cortocircuito

La CNEE solicita a las empresas transportistas que dentro del estudio se incluyan las simulaciones de cortocircuito trifásicas y monofásicas a tierra para las condiciones de demanda máxima y mínima, esto es necesario para determinar las corrientes que circulan por cada uno de los elementos que conforman el sistema eléctrico cuando se presenta una contingencia o falla. (Potencia y Tecnologías Incorporadas, S.A, 2015)

El análisis de cortocircuito tiene varias funciones para las empresas transportadoras, ya que gracias a los resultados que da el estudio se puede:

- Especificar equipos
- Calcular la malla de tierras
- Realización de estudios de coordinación de protecciones
- Dimensionamiento de conductores
- Cálculo de arco eléctrico

(Potencia y Tecnologías Incorporadas, S.A, 2015)

5.6. Subestaciones aisladas en gas GIS

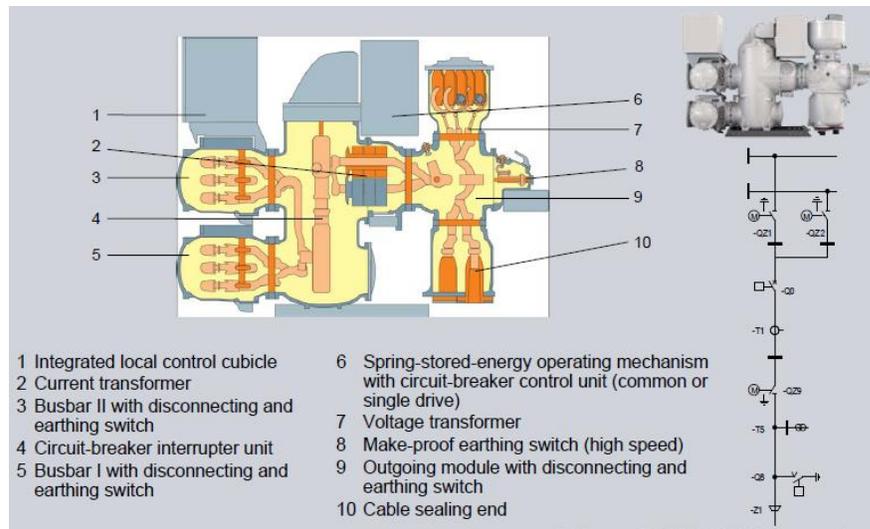
Las subestaciones de tecnología GIS usan el gas SF₆ para el aislamiento eléctrico de los diferentes componentes de alta tensión, en lugar de utilizar el aire como en las subestaciones comúnmente utilizadas (aisladas en aire).

Todos los equipos de alta tensión incluyendo las barras principales, están encapsulado independientemente en un compartimiento metálico (generalmente fabricado por aleaciones de aluminio) presurizado con gas SF₆ y dejando mandos y tomas de señales por un costado (Gomez & Vargas, 2011).

Los compartimientos de SF₆ son sellados de manera hermética al gas por medio de tapas hechas de material sintético y aislante impidiendo que éste se mueva hacia otros compartimientos, solo los conductores atraviesan este sellado para dar continuidad al camino de energía, de manera que al momento de hacer el llenado del gas SF₆, cada compartimiento se llena por separado, teniendo en cuenta las presiones de servicio y de llenado de cada equipo de la subestación que variarán dependiendo del tipo de equipo y del nivel de tensión de la subestación.

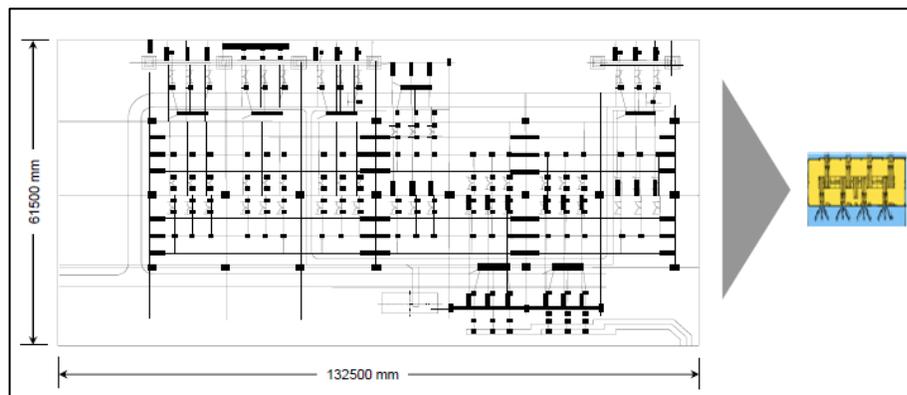
Así dependerá del diseño del fabricante que, considerando el espacio para la instalación, las condiciones del área tales como altura sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, tensión nominal y demás consideraciones eléctricas determinará si es recomendable encapsular las tres fases a lo largo de todos los compartimientos o disponer fase por fase. (Energy Siemens, 2011)

Figura 12. **Corte sección bahía GIS 69 kV arreglo tripolar, configuración doble barra y alimentada por cables subterráneos. Modelo Siemens 8DN8**



Fuente: Siemens AG, Gas Insulated Switchgear Type 8DN8. p. 5.

Figura 13. **Comparativa de requerimientos de espacio AIS versus GIS relación 50:1**



Fuente: Siemens AG, Gas Insulated Switchgear Type 8DN8. p. 30.

5.7. La evaluación ambiental

Generalmente, la evaluación ambiental se ha compuesto de un análisis técnico de una actividad o proyecto propuesto como parte de estudios de factibilidad. Se realiza para identificar y evaluar los posibles impactos negativos en el medio ambiente que pueden resultar a consecuencia de la implementación del proyecto, y para proponer una reducción adecuada de los riesgos, así como medidas de monitoreo adecuadas a la magnitud de los riesgos. (Rural Invest, 2007)

Por lo anterior, es de vital importancia que el proceso de evaluación ambiental se efectúe en las primeras fases de la concepción del proyecto, con el fin de que las medidas de reducción se puedan incorporar en el diseño del mismo. También se exige que la evaluación no puede ser un ejercicio puramente técnico llevado a cabo por especialistas externos; en su lugar, debe incluirse tanto a los beneficiarios del proyecto como a otras poblaciones afectadas dándole así una inclusión social. Además, la evaluación ambiental por lo general no se limita al entorno biofísico, sino que también incluye aspectos económicos, sociales y culturales propios de la región geográfica. (Rural Invest, 2007)

Finalmente, la evaluación ambiental es el proceso general de evaluaciones de los impactos ambientales asociados con las actividades de desarrollo humano, que varían desde estudios de impacto ambiental –EIA- de carácter holístico, a estudios más limitados. Es sumamente importante que se incluya la evaluación de los potenciales impactos negativos potenciales y la elaboración de medidas dirigidas, a mitigarlos y a monitorearlos. (Rural Invest, 2007)

6. ÍNDICE PROPUESTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
3. JUSTIFICACIÓN
4. ALCANCE
5. MARCO TEÓRICO
 - 5.1. Sistema de transporte de energía eléctrica
 - 5.2. Transportistas y su participación en el mercado
 - 5.2.1. Acuerdo entre partes
 - 5.2.2. Canon
 - 5.2.3. Costo anual de transporte
 - 5.3. Subestaciones eléctricas
 - 5.3.1. De acuerdo a su tipo de función
 - 5.3.2. De acuerdo con la potencia y nivel de tensión
 - 5.3.3. Equipos de alta tensión
 - 5.3.4. Equipos de transformación y compensación
 - 5.4. Configuración de operación de las subestaciones
 - 5.5. Estudios eléctricos

- 5.5.1. Estudios de flujos de carga
 - 5.5.2. Estudios de cortocircuito
- 5.6. Subestaciones aisladas en gas
- 5.7. Evaluación ambiental
 - 5.7.1. Estudios de impacto ambiental
 - 5.7.2. Monitoreo ambiental
 - 5.7.3. Medidas de mitigación ambiental
 - 5.7.4. Medidas de mitigación ambiental

- 6. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES TÉCNICAS PREVIAS A LA AMPLIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN
 - 6.1. Descripción de la tecnología de la instalación actual y su configuración eléctrica
 - 6.2. Análisis del flujo de potencia asociado a la configuración previa
 - 6.3. Elementos y esquemas de protección del sistema
 - 6.4. Determinación de las áreas de influencia directa e indirecta que enmarcan el proyecto
 - 6.5. Ubicación geográfica de la subestación y su impacto al ambiente

- 7. ESTUDIO DE LAS NUEVAS CONDICIONES ELÉCTRICAS Y TÉCNICAS TRAS LA AMPLIACIÓN DE LA SUBESTACIÓN
 - 7.1. Análisis de diagramas unifilares y las ventajas que ofrecen a la operación del sistema
 - 7.2. Análisis del flujo de potencia
 - 7.3. Evaluación de impacto y mejoras en la red eléctrica
 - 7.4. Análisis beneficio-costos enfocado a la tecnología GIS

8. MEDIDAS DE PREVENCIÓN ADOPTADAS PARA EL MANEJO Y MITIGACIÓN DEL USO DE HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF67
 - 8.1. Caracterización del hexafluoruro de azufre
 - 8.2. Determinación de la cantidad de gas presente en el proyecto y su nivel de riesgo
 - 8.3. Presentación de las guías para el manejo de gas en los equipos de alta tensión
 - 8.4. Propuesta de medidas de contingencia en caso de exposición al ambiente

9. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
 - 9.1. Evaluación de las características previas de la subestación dentro de la red
 - 9.2. Beneficios aportados al Sistema Nacional Interconectado y a los usuarios finales
 - 9.2.1. Beneficios económicos percibidos por la empresa de transporte de energía
 - 9.2.2. Nuevos índices de confiabilidad y estabilidad
 - 9.3. Medidas adoptadas para el resguardo del medio ambiente

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

7. METODOLOGÍA

7.1. Fase 1

Elaboración de diagrama unifilar y caracterización de los equipos y tecnología utilizada, esto mediante toma de información en campo con enfoque cualitativo y alcance descriptivo.

Extracción de información de la base de datos de CNEE y TRELEC para desarrollar el estudio de análisis de flujos de potencia mediante el software NePlan que utiliza el método Newton-Rhapson con variables experimentales y alcance correlacional.

Determinar las áreas de influencia directa e indirecta considerando aspectos como el uso actual del suelo, la presencia de vegetación, cercanía de cuerpos de agua, etc. Esta será de tipo cualitativo con alcance explicativo.

7.2. Fase 2

Simulación de magnitudes y escenarios para el estudio de análisis de flujos de potencia mediante el software NePlan que utiliza el método Newton-Rhapson con variables experimentales y alcance correlacional.

Evaluación de los flujos resultantes provocados por la ampliación y su impacto con flujos colindantes, mediante el método Newton-Rhapson, el alcance será explicativo con enfoque cuantitativo.

Establecer indicadores de confiabilidad del sistema mediante análisis modal de fallos y efectos (AMFE) con enfoque analítico mixto de alcance correlacional y diseño experimental.

Determinar un índice de beneficio-costo del proyecto evaluando los ingresos por CAT, la inversión y el índice de confiabilidad.

7.3. Fase 3

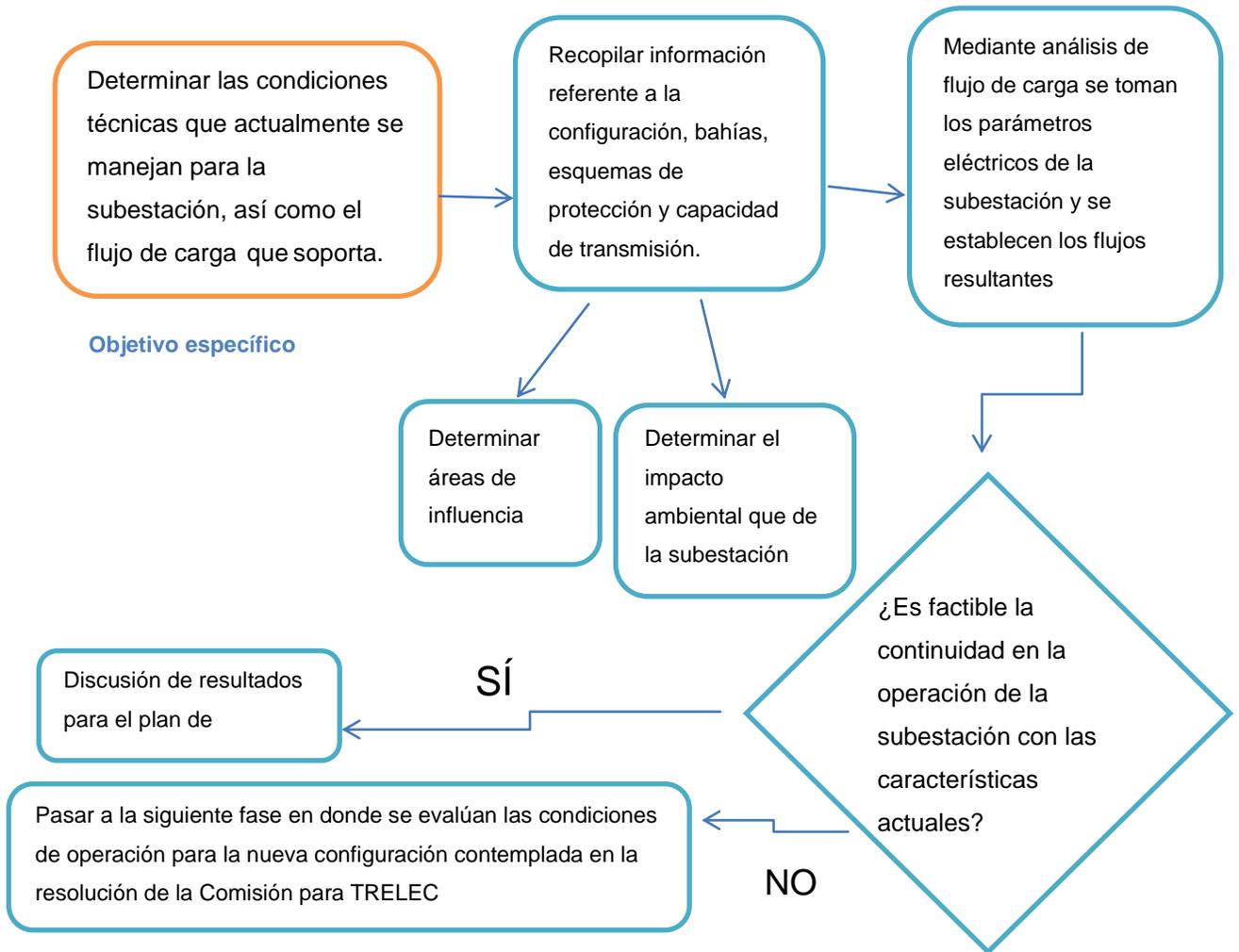
Cuantificar la masa y volumen ocupado por el SF₆ instalado en todo el proyecto y asignarle un nivel de riesgo, según normativa internacional, los datos serán tomados de la cantidad necesaria por los equipos, será de enfoque mixto con alcance descriptivo y no experimental.

Calcular mediante método Huella de Carbono el impacto potencial de la liberación de SF₆ al medio ambiente, este será de tipo cuantitativo de alcance descriptivo y diseño experimental.

Para el volumen total instalado dentro de las subestaciones se adaptarán medidas de medición, detección, control y mitigación apropiadas para contingencias como fugas por sobrepresión.

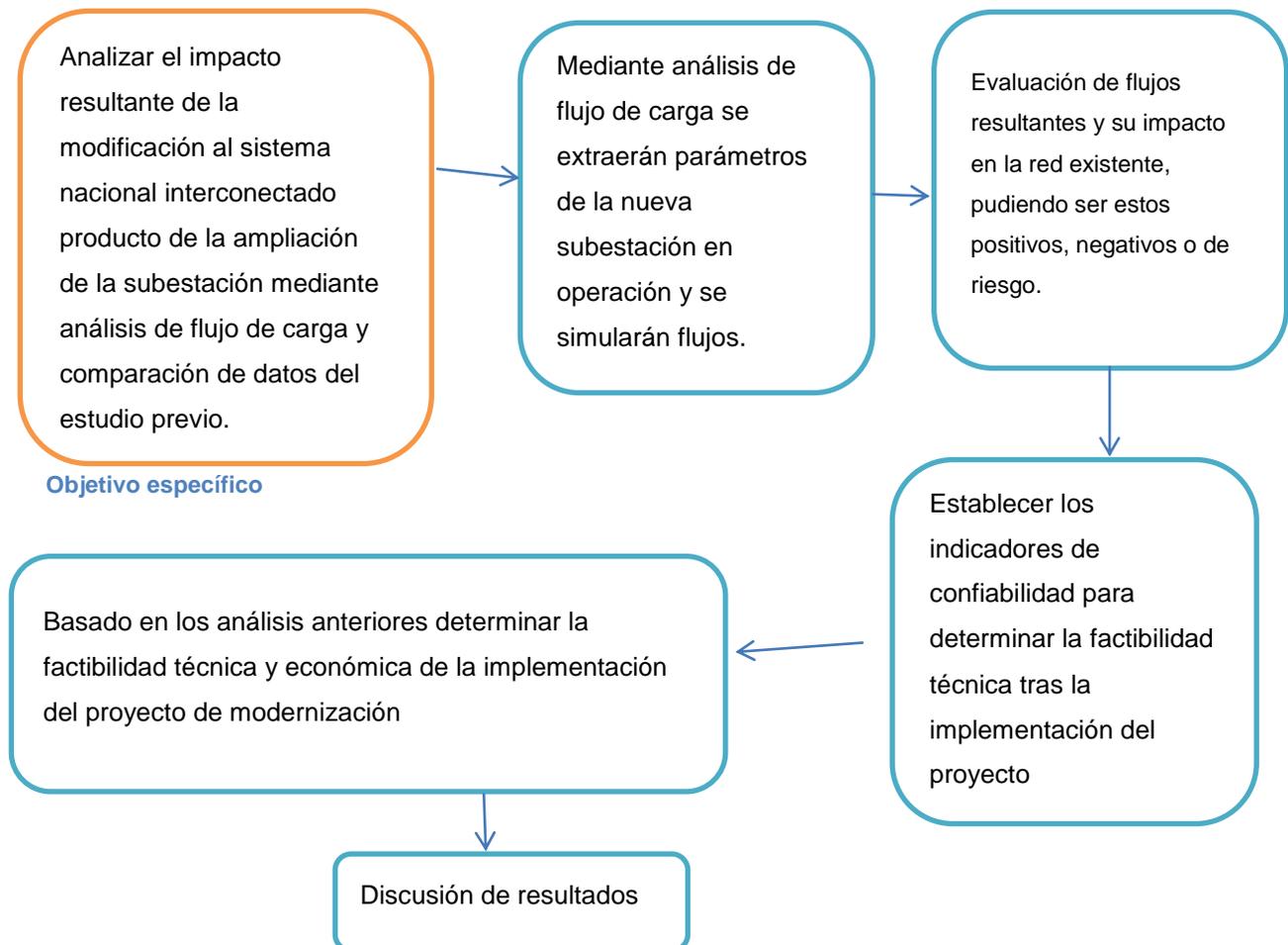
En los siguientes diagramas se ilustrarán los pasos de la metodología a seguir en cada fase:

Figura 14. Metodología ilustrada, fase 1



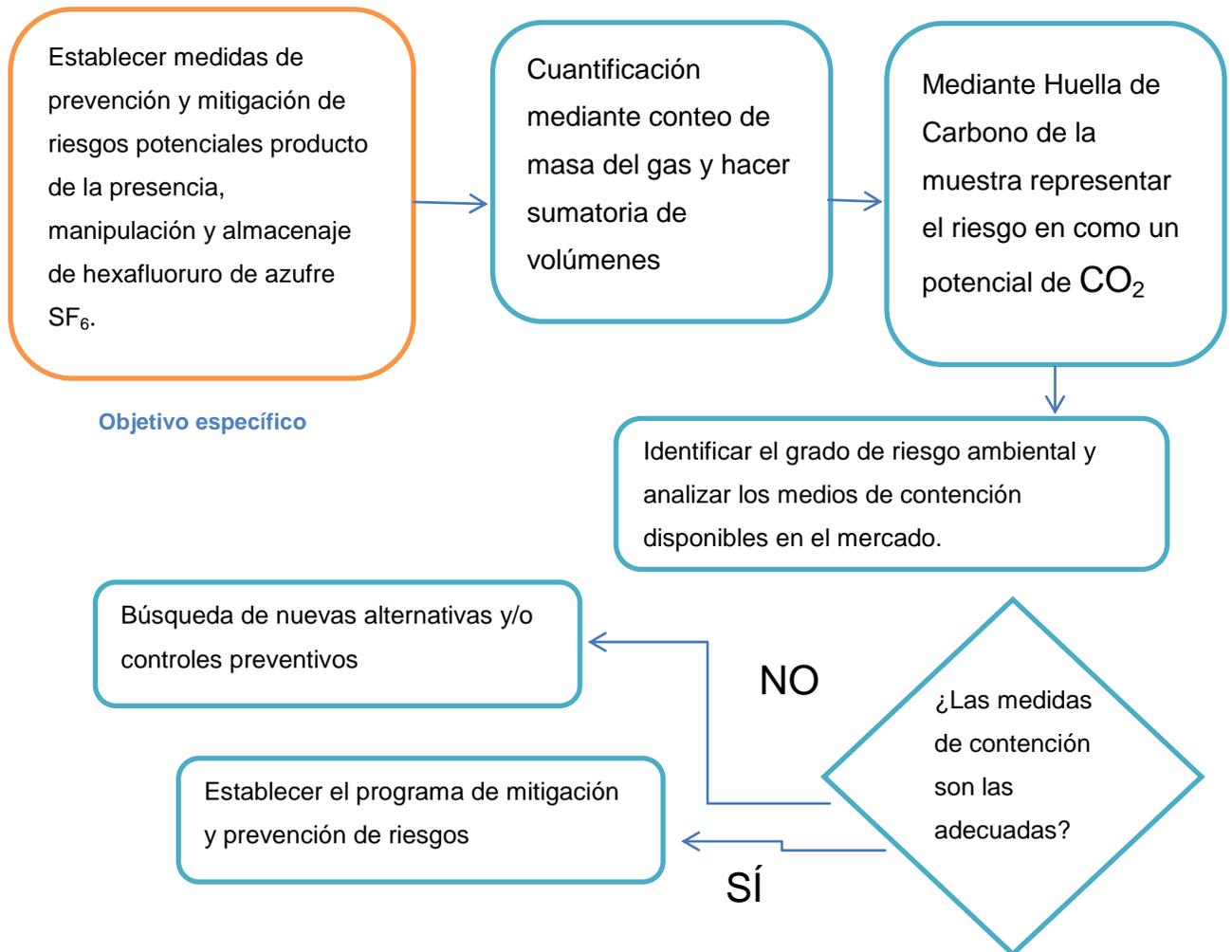
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Metodología ilustrada, fase 2



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Metodología ilustrada, fase 3



Fuente: elaboración propia.

8. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

- Método de análisis de flujos de potencia Newton-Rhapson: el software NePLAN Electricity es una herramienta para analizar, planificar, optimizar y simular redes eléctricas en la cual es posible graficar y verificar fácilmente varios casos de estudio de manera eficiente. Con esta herramienta se realizarán los estudios de flujo de carga utilizando la base de datos que se le solicitará a la CNEE y TRELEC.
- Matriz de probabilidad e impacto: se construirá una matriz que asigne las evaluaciones de riesgo (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto) a los riesgos o condiciones que se basan en combinaciones de escalas de probabilidad e impacto.
- Modelo de riesgos mediante metodo Montecarlo: Es la representación de la realidad a analizar a través de una estructura de cálculos matemáticos, en la cual se detectan las variables significativas de riesgo y se ponen en relación con el resto de variables que afectan a nuestro proyecto, y con las variables económicas sobre las que vamos a medir el nivel de riesgo del mismo, esto será utilizado para cuantificar las contingencias eléctricas que la subestación puede atravesar y para las contingencias relacionadas a las fugas de SF₆.
- Análisis modal de fallos y efectos: Esta herramienta se basa en una lógica aplastante, es decir, debemos evaluar el fallo o error producido para saber cómo se produce y cuáles son sus repercusiones cuando se produce, para que, con todo este conocimiento, podamos determinar

cómo debe minimizar o eliminar la posibilidad que se vuelva a producir este error o, en el caso de no realizar esto, minimizar la repercusión que este fallo puede tener sobre el sistema.

- Huella de carbono: Es una de las formas más simples que existen de medir el impacto o la marca que deja una persona sobre el planeta en su vida cotidiana. Es un recuento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), que son liberadas a la atmósfera, debido a nuestras actividades cotidianas o a la comercialización de un producto. Por lo tanto, la huella de carbono es la medida del impacto que provocan las actividades del ser humano en el medio ambiente y se determina según la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero producidos, medidos en unidades de dióxido de carbono equivalente.

9. 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.

Tabla I. **Cronograma de actividades de periodicidad semanal**

No	ACTIVIDADES:	SEMANAS											
		MES 1				MES 2				MES 3			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Recopilación de información	■	■										
2	Visitas técnicas	■	■										
3	Comparación AIS vs GIS		■	■									
4	Análisis de flujo de carga		■	■	■								
5	Análisis de contingencias				■	■							
6	Explicación de resultados					■							
7	Proyección económica					■	■						
8	Análisis gráfico e interpretación de resultados						■	■					
9	Análisis del impacto ambiental y evaluación de contingencias						■	■					
10	Redacción de informe final								■				
11	Presentación									■			

Fuente: elaboración propia.

10. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la ejecución de esta investigación son necesarios los siguientes recursos:

Tabla II. **Recursos, disponibilidad y obtención**

Recurso	Requerimiento	Cumple	Método de obtención
Recursos humano	Personal con experiencia dirección de construcción de subestaciones eléctricas	Si	Solicitar apoyo de compañeros de trabajo para colaboración ad honorem con esta investigación.
Financiero	No se necesita de financiamiento para inversión en vehículos, maquinaria o pagos	Si	Recursos propios.
Tecnológico	Se requiere utilizar una licencia provisional de NePlan para realizar los estudios de flujo de carga.	Si	Permisos especiales en el trabajo
Acceso a información	Trabajar dentro de la corporación da acceso a la información necesaria para realizar el estudio.	Si	Permisos especiales en el trabajo
Permisos	Permisos para utilizar la información de la empresa	Si	Permisos especiales en el trabajo
Equipo	Se cuenta con el equipo necesario para realizar el estudio.	Si	Acceso a diseños de equipos de subestaciones eléctricas
Infraestructura	N/A	N/A	N/A

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Costos de realización**

	Costo/hora	Horas estimadas	Total
Horas hombre	Q 48,00	180	Q 8 640,00
	Depreciación anual	Horas estimadas	
Depreciación de equipo de computo	Q 1 666,67	180	Q 821,92
	Costo/km	km	
Kilometraje	Q 2,94	130	Q 382,20
	Costo/impresión	hojas	
Impresiones	Q 0,25	200	Q 50,00
	Costo/kWh	kWh estimados	
Consumo de energía eléctrica	Q 1,13	45	Q 50,85
	Costo		
Permisos	Q 0,00	45	Q 0,00
		TOTAL	Q 9 944,97

Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo de la investigación se necesita un total de Q 9 944,97. Sí se dispone de los recursos necesarios para el desarrollo del mismo, siendo estos por financiamiento propio; por lo que la investigación es factible.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB. *GIS integrada, subestaciones modulares en recintos prefabricados.* [En línea]. <<http://new.abb.com/docs/librariesprovider78/chile-documentos/jornadas-tecnicas-2013---presentaciones/7-jessica-ponce-de-le%C3%B3n---tecnolog%C3%ADa-gis-integrada-subestaciones-modulares-en-recintos-prefabricados.pdf?sfvrsn=2>>. [Consulta: 10 de octubre de 2017].
2. CARRETERO PÉREZ, Ignacio. *Modelado y comparativa técnico-económico de subestaciones.* [En línea]. <<http://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/46e9219f4524b.pdf>>. [Consulta: 15 de octubre de 2017].
3. CNEE. *Ley general de electricidad.* [En línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/LEY%20GENERAL%20DE%20ELECTRICIDAD.pdf>>. [Consulta: 11 de octubre de 2017].
4. _____. *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: 9 de octubre de 2017].

5. _____ . *Planes de expansión del sistema eléctrico guatemalteco*. [En línea]. < <<http://www.cnee.gob.gt/PEG/Docs/PET%20esp.pdf>>. [Consulta: 9 de octubre de 2017].
6. ENERGY SIEMENS. *Energía en movimiento*. [En línea]. <<https://www.energy.siemens.com/co/pool/co/publicaciones/energia-en-movimiento/mayo-2011/energia-en-movimiento-8-mayo-2011.pdf>>. [Consulta: 17 de octubre de 2017].
7. GRAINGER, Jhon. *Análisis de sistemas de potencia*. 3a ed. North Carolina, Estados Unidos: McGraw-Hill. 1985. 230 p.
8. 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.
9. MARTIN, Raull. *Diseño de subestaciones eléctricas*. México: McGraw-Hill. 1987. 504 p.
10. PARLAMENTO EUROPEO. *Reglamento (CE) 842/2006 del Parlamento Europeo sobre gases de efecto invernadero*. [En línea]. <<http://data.europa.eu/eli/reg/2006/842/2008-12-11/spa/pdf>>. [Consulta: 23 de octubre de 2017].

11. RURAL INVEST. *Formulación y empleo de perfiles de proyecto*. [En línea]. <<http://www.fao.org/3/a-a1420s.pdf>>. [Consulta: 20 de octubre de 2017].
12. STEVENSON, William. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. México: McGraw-Hill. 1979. 504 p.
13. VILLEGAS, Mejía. *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. 2a ed. Colombia: HVM Ingenieros. 1991. 778 p.
14. ZVEI- Zentrainverband Elektrotechnik und elektronindustrie. *Documentos de formación relativa al SF₆*. 1a ed. Alemania: Frankfurt am Main. 2012. 56 p.

