



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
REACTORES MULTITAPA EN LAS SUBESTACIONES CHIANTLA Y COVADONGA PARA  
LA REGULACIÓN DE TENSIÓN Y SU EFECTO EN LA ZONA DE INFLUENCIA ELÉCTRICA**

**David Antonio López Orellana**

Asesorado por el Msc. Ing. José Emilio Zambrano Quinteros

Guatemala, marzo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
REACTORES MULTITAPA EN LAS SUBESTACIONES CHIANTLA Y COVADONGA PARA  
LA REGULACIÓN DE TENSIÓN Y SU EFECTO EN LA ZONA DE INFLUENCIA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**DAVID ANTONIO LÓPEZ ORELLANA**

ASESORADO POR EL MSC. ING. JOSÉ EMILIO ZAMBRANO QUINTEROS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELÉCTRICISTA**

GUATEMALA, MARZO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REACTORES MULTITETAPA EN LAS SUBESTACIONES CHIANTLA Y COVADONGA PARA LA REGULACIÓN DE TENSIÓN Y SU EFECTO EN LA ZONA DE INFLUENCIA ELÉCTRICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 21 de agosto de 2021.

**David Antonio López Orellana**



**EEPFI-PP-0076-2022**

Guatemala, 12 de enero de 2022

**Director**  
**Armando Alonso Rivera Carrillo**  
**Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica**  
**Presente.**

**Estimado Ing. Rivera**

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

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REACTORES MULTITAPPA EN LAS SUBESTACIONES CHIANTLA Y COVADONGA PARA LA REGULACIÓN DE TENSIÓN Y SU EFECTO EN LA ZONA DE INFLUENCIA ELÉCTRICA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Todas las áreas - Nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica**, presentado por el estudiante **David Antonio Lopez Orellana** carné número **201180014**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion De Mercados Electricos Regulados.

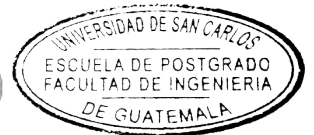
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para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

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Mtro. José Emilio Zambrano Quinteros  
asesor(a)  
**José Emilio Zambrano Quinteros**  
**INGENIERO ELECTRICISTA**  
COL. 12265

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



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





EEP-EIME-0076-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REACTORES MULTITAPA EN LAS SUBESTACIONES CHIANTLA Y COVADONGA PARA LA REGULACIÓN DE TENSIÓN Y SU EFECTO EN LA ZONA DE INFLUENCIA ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario **David Antonio Lopez Orellana**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



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

Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.211.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REACTORES MULTITAPA EN LAS SUBESTACIONES CHIANTLA Y COVADONGA PARA LA REGULACIÓN DE TENSIÓN Y SU EFECTO EN LA ZONA DE INFLUENCIA ELÉCTRICA**, presentado por: **David Antonio López Orellana**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Aurelia Anabela Cordova   
Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Mi padre** Dennis López, por su ejemplo y su apoyo incondicional hasta el último día de su vida.
- Mi madre** Judith Orellana, porque a pesar de la distancia siempre me hizo sentir su presencia y su amor.
- Mis hermanos** Antonio, Rodrigo y Jared López, Noe y Lisbeth Coello, y Paola Fernández, por ser el amor más grande de mi vida.
- Mis abuelos** Ana Castellanos, Vilma Trochez y Donaldo Montoya, por su cariño y su apoyo.
- Mi madrastra** Daisy Zavala, por ser la compañera de vida de mi padre hasta el final y por siempre brindarme su apoyo.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitirme formarme como profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme los conocimientos que me han permitido desarrollarme como profesional.
<b>Transportadora de Energía de Centroamérica (Trecsa)</b>	Por formar mi experiencia laboral en sobremanera y permitirme poner en práctica lo aprendido.
<b>Mis amigos de la carrera</b>	Juan Segura, Rodrigo Ovando, Marco Flores y Emilio Gamboa, por su amistad y apoyo brindado.
<b>Mi asesor</b>	José Zambrano, por su apoyo y por compartir experiencias y conocimientos que enriquecieron mi perfil profesional.
<b>Mis jefes</b>	Juan Zea y Wendy Santos, por brindarme la oportunidad y confianza necesaria para desarrollarme como profesional.

**Mis compañeros de  
Trecsa**

Tahiri Aguilar, Lisbeth Fuentes, Jonathan García, por el apoyo brindado y los conocimientos compartidos que me ayudaron a desempeñar mis labores.

**Ingenieros de Trecsa**

Carlos Vargas, Rene Selva, José Morataya, y Rómulo Orozco por las enseñanzas, conocimientos y experiencias compartidas para mi desarrollo profesional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3.1. Contexto general .....	9
3.2. Descripción del problema .....	10
3.3. Formulación del problema .....	11
3.4. Delimitación del problema.....	12
3.4.1. Delimitación geográfica.....	13
3.4.2. Delimitación contextual .....	13
3.4.3. Delimitación temporal.....	13
4. JUSTIFICACIÓN .....	15
5. OBJETIVOS.....	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos .....	17
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	19

7.	MARCO TEÓRICO .....	23
7.1.	Elementos que componen los sistemas eléctricos de potencia	23
7.1.1.	Líneas de transmisión .....	23
7.1.1.1.	Línea de transmisión corta.....	24
7.1.1.2.	Línea de transmisión media .....	25
7.1.1.3.	Línea de transmisión larga.....	25
7.1.2.	Subestaciones eléctricas y equipos básicos .....	26
7.1.2.1.	Interruptor de potencia.....	27
7.1.2.2.	Seccionadores .....	29
7.1.2.3.	Transformadores de tensión .....	30
7.1.2.4.	Transformadores de corriente.....	33
7.1.2.5.	Pararrayos.....	34
7.1.3.	Transporte de energía eléctrica .....	35
7.2.	Parámetros del sistema.....	35
7.2.1.	Potencia activa .....	36
7.2.2.	Potencia reactiva .....	36
7.2.3.	Potencia aparente .....	37
7.2.4.	Niveles de tensión .....	37
7.3.	Reactores Multietapa en Derivación (RMD) .....	39
7.3.1.	Aplicaciones de los Reactores Multietapas en Derivación .....	41
7.3.2.	Aspectos constructivos de los reactores multietapa en derivación .....	42
7.3.3.	Control y operación de los reactores multietapa en derivación .....	44
7.4.	Análisis de flujos de potencia .....	46
7.4.1.	Teoría de análisis de flujos de potencia.....	46
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	49

9.	METODOLOGÍA .....	53
9.1.	Características del estudio.....	53
9.1.1.	Unidades de análisis .....	54
9.1.2.	Variables.....	54
9.2.	Fases del estudio.....	56
9.2.1.	Fase 1: recopilación bibliográfica, Planteamiento y armado de casos de análisis mediante simulaciones .....	56
9.2.2.	Fase 2: realización de simulaciones.....	59
9.2.2.1.	Fase 2.1. simulaciones para el análisis de tensión .....	59
9.2.2.2.	Fase 2.2. simulaciones para el análisis de valores de perdidas .....	60
9.2.2.3.	Fase 2.3. simulaciones para el análisis de confiabilidad .....	60
9.2.2.4.	Fase 2.4. simulaciones para el análisis de características y funcionamiento de los RMD.....	61
9.3.	Resultados esperados e interpretación.....	61
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	63
11.	CRONOGRAMA.....	67
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	69
13.	REFERENCIAS.....	71
14.	APÉNDICES .....	75



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Necesidades a cubrir .....	19
2.	Esquema de solución de diseño de investigación .....	20
3.	Circuito básico de una línea de transmisión .....	24
4.	Circuito equivalente línea de transmisión corta .....	24
5.	Circuito equivalente línea de transmisión media .....	25
6.	Diagrama esquemático de una línea de transmisión larga .....	26
7.	Desarrollo de interrupción en una falla trifásica .....	28
8.	Interruptor tripolar de potencia .....	29
9.	Seccionadores de línea de apertura central .....	30
10.	Transformador de tensión inductivo .....	31
11.	Circuito interno transformador de tensión capacitivo .....	32
12.	Transformador de potencial capacitivo .....	32
13.	Transformador de corriente .....	33
14.	Pararrayos .....	34
15.	Ejemplo de forma física de un reactor multietapa en derivación .....	40
16.	Ejemplo de un reactor en derivación conectado a una línea de transmisión.....	41
17.	Diseño principal de la parte activa de un RMD .....	42
18.	Concepto de núcleo con espacio libre monofásico .....	43
19.	Reactor Multietapa en Derivación subestación Chiantla .....	44
20.	Tipos de regulación de un reactor multietapa en derivación .....	45
21.	Rango factible de regulación dependiendo de su voltaje .....	45
22.	Diagrama de tres barras.....	47

23.	Componentes de diagrama de caja y bigotes .....	65
24.	Ejemplo de barras a analizar .....	66
25.	Cronograma de actividades .....	67

## **TABLAS**

I.	Tolerancia admisible respecto del valor nominal, en porcentaje .....	38
II.	Variables .....	55
III.	Definición de variables.....	55
IV.	Ejemplo de tabulación de datos .....	63
V.	Costos de la investigación .....	69



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Y</b>	Admitancia
<b>=</b>	Igual que
<b>Z</b>	Impedancia
<b>km</b>	Kilómetro
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>kV</b>	Kilovoltio
<b>&gt;</b>	Mayor que
<b>MVA<sub>r</sub></b>	Mega Voltamperios Reactivos
<b>MWh</b>	Megavatio hora
<b>MW</b>	Megavatio
<b>%</b>	Porcentaje
<b>P</b>	Potencia
<b>Q</b>	Quetzales
<b>W</b>	Vatio



## **GLOSARIO**

<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista.
<b>Bahía</b>	Conjunto de equipos para un circuito de línea de transmisión, transformación o compensación.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
<b>MEM</b>	Ministerio de Energía y Minas.
<b>RMD</b>	Reactores Multietapa en Derivación.
<b>SEP</b>	Sistemas Eléctricos de Potencia.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado.
<b>Tensión</b>	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en Voltios.
<b>Vatio</b>	Unidad de medida de potencia.



## RESUMEN

El crecimiento de los sistemas eléctricos depende en su totalidad de los planes de expansión de generación y transmisión, estos planes conllevan la construcción e implementación de plantas de generación, subestaciones eléctricas y de líneas de transmisión, luego de la adición de lo anteriormente mencionado, las condiciones del sistema pueden variar en diferentes escenarios, como es el caso del incremento en los niveles de tensión por efectos capacitivos en las líneas de transmisión.

El objetivo general de este diseño de investigación es estudiar la factibilidad de la instalación de dos reactores multietapa en las subestaciones Chiantla 230/69 kV y Covadonga 230 kV, para regular los niveles de tensión elevados en la zona occidental del país, mediante la realización de simulaciones con la herramienta informática PSSE se podrán determinar las mejoras o efectos que la implementación de estos equipos tendrá en el Sistema Nacional Interconectado.

Con las simulaciones realizadas según los casos de estudio se obtendrán los valores correspondientes de niveles voltaje, perdidas y se podrá establecer la confiabilidad que estos equipos brindaran al SNI de Guatemala, toda la información obtenida de estas simulaciones será contrarrestada con los valores establecidos en la normativa vigente para establecer un criterio objetivo de la factibilidad de esta implementación no realizada anteriormente en ningún país de la región centroamericana.



# 1. INTRODUCCIÓN

La planificación de los sistemas de transporte de energía eléctrica es clave para el abastecimiento de las necesidades energéticas de los países, lo que permite un desarrollo económico ordenado, sin embargo, la ampliación del sistema de transmisión conlleva efectos adversos intrínsecos de los elementos que se adicionan, tal es el caso del incremento de voltaje debido a la adición de líneas de transporte de longitud considerable en zonas de baja demanda de energía eléctrica y alta inyección de generación, derivado de estos efectos adversos es necesaria la implementación de tecnologías de compensación reactiva y regulación de voltaje, el presente trabajo aborda la línea de investigación de Nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica en el apartado Análisis e impactos de la innovación tecnológica, esto tras tratarse de equipos no instalados previamente en la región de Centroamérica.

Es de suma importancia para los sistemas eléctricos de potencia operar las instalaciones dentro de los parámetros de calidad y seguridad operativa que establecen las buenas prácticas de ingeniería, es de tal cuenta que la implementación de los elementos que permitan mantener los parámetros antes mencionados dentro de los límites de tolerancia constituye una optimización para la operación de los sistemas antes mencionados, en el primer capítulo podremos estudiar los elementos que conforman los sistemas de transporte de energía y los parámetros importantes a analizar para la operación oportuna y correcta de los sistemas de transporte, de igual forma en este capítulo podremos estudiar la construcción, funcionamiento y características de los Reactores Multietapa en Derivación.

En el segundo capítulo mediante herramientas informáticas de análisis de sistemas de potencia se establecerán los parámetros de operación del sistema y mediante escenarios se replicarán las condiciones operativas que permitan identificar la factibilidad de la implementación de los reactores multietapa en derivación, con la realización de estas simulaciones y la obtención de datos y aplicando métodos numéricos y estadísticos se podrán observar los beneficios de dicha implementación.

En el tercer capítulo se estarán abordando de manera puntual cada uno de los casos realizados y simulados, donde mediante el método estadístico de cajas y bigotes podremos determinar y recomendar si los valores compensados de reactiva permiten que se regule la tensión y estos se encuentren dentro de los rangos permitidos por la normativa vigente en Guatemala.

En los capítulos de conclusiones y recomendaciones se abordan los puntos importantes observados posterior a la realización de las simulaciones en cuanto a los niveles óptimos de voltaje, pérdidas, potencia reactiva y de confiabilidad (en base a contingencias por sobretensión), lo que permitirá determinar la factibilidad de esta nueva tecnología en el Sistema Nacional Interconectado.



## 2. ANTECEDENTES

En su investigación Martínez (2007) aborda las sobretensiones para la subestación Tactic, cabe mencionar que las sobretensiones son efectos que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia por diferentes motivos y tienen algunas consecuencias.

Efectos de las sobretensiones:

- Someten a los aislantes a esfuerzos que los envejecen y pueden llegar a destruirlos.
- En caso de duración prolongada traen como consecuencia daños en los equipos tanto de los usuarios como de generación y transformación.
- En caso de una falla del aislante, traen a su vez como consecuencia inmediata un cortocircuito (Martínez, 2007, p. XV).

Parte del trabajo realizado por Martínez (2007) se basa en que, mediante la utilización de una herramienta informática se pueda modelar matemáticamente las sobretensiones de la subestación Tactic por el efecto Ferranti, efecto que como hace mención “Es producido en las líneas de alta tensión con un bajo nivel de carga o en vacío” (p. XI).

Este efecto es similar al efecto de sobretensión que se estará abordando en la presente investigación por lo que el análisis del estudio de Martínez permite tener un panorama del efecto de este fenómeno y, además, en una subestación del Sistema Nacional Interconectado, el estudio de Martínez aporta la

profundidad del problema central de esta investigación, que son las sobretensiones en transmisión de energía, de su estudio se toma en cuenta cómo deben de abordarse estos fenómenos y sus consecuencias.

En el caso de investigación de Vásquez (2011) menciona que “En la regulación de tensión intervienen muchos factores como la longitud de la línea, el nivel de tensión de transmisión, la carga conectada, el factor de potencia de la carga, etc.” (p. XXXI), es por eso por lo que al momento de añadir nuevos elementos a los sistemas eléctricos de potencia los parámetros de voltaje y las pérdidas sufren cambios y variaciones en sus valores.

En el estudio de Vásquez (2011) el punto de investigación es mapear e identificar los nodos donde en el SNI debe de instalarse para una compensación reactiva para una óptima regulación de tensión.

Tal y como bien indica Vásquez (2011) “existen varios equipos para la compensación de potencia reactiva, éstos influyen en el control de voltaje y la potencia reactiva”, (p. XXXI). Si bien los equipos analizados en su investigación difieren en cuanto a los RMD en su forma de operación, el principio fundamental para la regulación de voltaje mediante compensación reactiva es el mismo, en esencia el estudio de Vásquez aporta la experiencia de realizar un análisis al sistema a una escala mayor de la que se está realizando esta investigación, de igual forma el análisis realizado en su trabajo en cuanto a la capacidad de transmisión de las líneas nos aporta una perspectiva de cómo se puede emplear de mejor manera la funcionalidad de los reactores, y así poder realizar simulaciones donde la transmisión de energía sea de una forma eficiente.

Es de suma importancia el identificar los nodos donde debe de instalarse compensación reactiva, esto permite una mejor planificación de los Sistemas

Eléctricos de Potencia, en esta investigación Vásquez (2011) mediante análisis de flujos de potencia con la herramienta informática Power World simula las diferentes características del SNI y así observó los valores de magnitud y ángulo del voltaje en los nodos del sistema, es por eso que es una referencia, ya que de manera similar en esta investigación mediante una herramienta informática se simula la situación actual en la zona occidental del país, de esta manera se observan los valores de tensión y la cantidad de potencia reactiva necesaria a compensar.

Como hace mención Guerra (2018) “Desde el punto de vista de la planificación y expansión del sistema, la compensación es considerada un aspecto crucial para planificar las redes dentro de los rangos de confiabilidad aceptados”, (p. i), es por eso que su estudio es de suma importancia a pesar de ser un estudio realizado para la red de Chile.

En su investigación Guerra (2018) hace énfasis en que “La compensación shunt puede ser instalada cerca de la carga, en una subestación de distribución, a lo largo de un alimentador o en una subestación de transmisión” (p.22), el presente estudio realiza el análisis de compensación *shunt* en subestaciones de transmisión, también desarrolla su trabajo y emplea simulaciones de flujos de potencia para la compensación reactiva, una práctica que establece como válida a tomar en cuenta para el análisis de planificación de los sistemas, esta investigación aporta como la compensación reactiva *shunt* o en derivación difiere a la compensación en serie, adicionalmente.

Guerra (2018) estudia sistemas internacionales y las normas empleadas para el manejo de compensación reactiva, algo que es de ayuda para tener un panorama más amplio de cómo realizar mejoras en el sistema.

Cabe mencionar que el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala esta “conformado por plantas generadoras, líneas de transmisión, líneas de distribución y grandes usuarios acoplados entres sí, para el funcionamiento del sistema eléctrico de una región, estado o nación.” (López, 2015, p. XXIII). Adicionalmente derivado de la Planificación del Sistema Nacional Interconectado se construyen y entran en operación nuevas obras como son, líneas de transmisión y subestaciones, obras que si bien tienden a mejorar la capacidad del sistema, en ciertas condiciones generan cambios significativos en los valores de flujos de potencia y niveles de tensión en la red.

En su trabajo López (2015) analiza un problema de regulación de tensión en una línea de transmisión entre Guatemala y Honduras, al tratarse de una línea de transmisión con una longitud considerable se manifiesta el fenómeno de sobretensiones. En los sistemas donde no se encuentre compensación reactiva y donde se presenten sobretensiones por baja demanda López menciona que debe de esperarse a que la demanda crezca para cerrar la línea de transmisión que se abrió.

La potencia reactiva es uno de los parámetros que sufre mayor impacto al modificarse la topología de los SEP, siendo esta una variable que modifica directamente los valores de voltaje, derivado de lo anterior es importante mencionar que.

La potencia reactiva:

Puede ser tan necesaria, como también ocasionar problemas en un sistema de potencia si no es regulada debidamente. Este componente de la potencia aparente es la que crea los campos eléctricos y magnéticos, por lo que en definitiva estará involucrada dentro de la mayoría de las

máquinas generadoras, al igual que en las líneas de transmisión, pues las mismas son las que transportan ambos componentes de la potencia aparente (López, 2015, p. 1).

Por lo anterior, deben de realizarse un estudio mediante simulaciones de flujos de carga para la identificación de los nodos donde estos equipos de compensación deben de instalarse y la cantidad de potencia reactiva (MVar) que deben de ser compensada. El aporte de este estudio a la presente investigación es el análisis de como regular el voltaje en líneas de transmisión de longitud considerable, así como las líneas de transmisión objeto de este estudio.

Tal y como en su estudio Coto, Pérez y Vásquez (2015) establecen que para poder calcular los valores de distribución de potencia activa y potencia reactiva deben de realizarse análisis de flujos de potencia o de carga, y que existen diferentes herramientas para poder realizar simulaciones y así tomar en cuenta los puntos importantes donde instalar la compensación reactiva, para el caso del presente diseño de investigación se estará utilizando la herramienta PSS – E Versión 33, por lo que su trabajo es de mucha ayuda al momento de realizar las simulaciones, ya que en el capítulo tres de su investigación realizan una introducción y análisis de la herramienta informática.

Khorami (2011) menciona que los reactores de compensación reactiva variables en derivación: *“They are typically used during light load conditions since they decrease the voltage level. The shunt reactor can be directly connected to the line or through the tertiary winding of a three winding transformer”* (p. 23) [Suelen utilizarse durante condiciones de cargas ligeras ya que disminuyen el nivel de voltaje. El reactor de derivación puede ser directamente conectado a la línea a través del devanado terciario de un transformador de tres devanados].

En el caso del trabajo de Khorami (2011) se profundiza en el funcionamiento, características y operación de Reactores Multietapa en derivación, su estudio es de vital ayuda para el desarrollo de este trabajo ya que actualmente no se existe mucha bibliografía sobre estas tecnologías.

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

#### **3.1. Contexto general**

Uno de los problemas habituales en la planificación de Sistemas de Transporte resulta de la necesidad de introducir bajo determinadas circunstancias en la red, elementos que controlen la potencia reactiva. Las principales ventajas de la compensación reactiva son:

- Aumento de la capacidad de transporte y dimensionado adecuado de la instalación, debido a la disminución en el valor eficaz de la intensidad consumida por el conjunto de la carga más equipo de compensación.
- Reducción de las pérdidas.
- Mantenimiento y regulación de la tensión, debido a la relación existente entre la reactiva y la tensión.
- Automatización y disminución del tiempo de respuesta en las operaciones en el SNI.

Los nuevos proyectos del Plan de Expansión que se están construyendo actualmente poseen líneas de transmisión con distancias considerables, lo cual tiende a provocar mayores pérdidas en el punto de entrega, un efecto capacitivo y de sobretensión en el sistema. Un sistema de transmisión para ser más efectivo debe poder compensar su potencia reactiva de una forma eficiente. Por lo tanto, en la resolución (CNEE-194-2019, 2019) se establece el requisito de la Instalación e implementación de dos unidades de compensación reactiva multietapas para la puesta en operación comercial de la subestación Chiantla, la cual se conectará con las subestaciones Covadonga y Huehuetenango II.

Lo anterior, en virtud de la solicitud por parte de la empresa Transportadora de Energía de Centroamérica (TRECESA) para la *Modificaciones Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental del Proyecto PET-01-2009, Plan de Expansión de Transporte 2008-2018 Lote B, Segunda Alternativa a Subestación Chiantla 230/69 kV y Adecuación de Líneas de Transmisión Asociadas*. El estudio de la implementación de estas unidades coadyuva a la realización de proyectos o implementación de equipos similares en otros puntos o áreas del SNI donde pueda llegar a darse situaciones de igual índole. Adicionalmente, es importante mencionar que actualmente en la región centroamericana no se cuenta con equipos de compensación reactiva multietapas y con variación automática, lo que hace el estudio de su funcionalidad, la forma de operación y factibilidad de estos equipos al ser conectados al SIN de suma importancia.

### **3.2. Descripción del problema**

La construcción e implementación de líneas de transmisión de longitudes medianas en el Sistema Nacional Interconectado (SNI) supone un incremento en los niveles de voltaje debido al efecto capacitivo que se manifiesta en las líneas mencionado anteriormente. Adicionalmente, en el área del país objeto de la presente investigación se encuentra una cantidad significativa de generación hidroeléctrica y una baja demanda de energía eléctrica, lo que a su vez ocasiona descompensación de potencia reactiva.

Posterior a la solicitud de la empresa Transportadora de Energía de Centroamérica, Sociedad Anónima (TRECESA) para la *Modificaciones Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental del Proyecto PET-01-2009, Plan de Expansión de Transporte 2008-2018 Lote B, Segunda Alternativa a Subestación Chiantla 230/69 kV y Adecuación de Líneas de Transmisión Asociadas*, el ente regulador



la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) realizó oportunamente la consulta de lo expuesto a los transportistas involucrados.

Luego de las recomendaciones de estos agentes transportistas y el ente operador del sistema el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) la CNEE resolvió mediante la resolución CNEE-194-2019 la implementación de dos equipos de compensación reactiva multietapa de 30 MVAR con un mínimo de 3 etapas de 10 MVAR cada uno, los cuales deben ser instalados y puestos en operación comercial previo a la puesta en operación comercial de la subestación Chiantla para la aceptación de obras y habilitación comercial de esta subestación.

Lo resuelto por la CNEE, deriva que los agentes transportistas con líneas de transmisión aledañas manifestaron la importancia de la instalación de los equipos antes mencionados para el aprovechamiento de regulación de potencia reactiva en la zona, donde existen antecedentes de aperturas del sistema ocasionadas por sobretensiones. Se hace de suma importancia el estudio de la factibilidad de instalación de estos equipos en las subestaciones Chiantla y Covadonga para la compensación de potencia reactiva y regulación de tensión en el área, adicionalmente se busca estudiar y comprender el principio de funcionalidad y operación de estos equipos, los cuales actualmente no se encuentran implementados en ningún sistema eléctrico de los países de la región de Centroamericana.

### **3.3. Formulación del problema**

Al tratarse de tecnología nunca antes implementada en el sistema de transmisión nacional es de suma importancia conocer el funcionamiento, factibilidad e impacto de estos equipos en el Sistema Nacional Interconectado, planteando las siguientes preguntas.

- **Pregunta central**

¿Es factible técnicamente la instalación de las unidades de compensación reactiva multietapas mediante la realización de simulaciones?

- **Preguntas auxiliares**

- ¿Cuáles serán los niveles de tensión en los nodos de las subestaciones Chiantla y Covadonga con la implementación de los reactores multietapa?
- ¿Cuáles son los niveles de pérdidas previo y posterior a la implementación y puesta en operación de los reactores multietapas?
- ¿Aportará confiabilidad al sistema en el área de influencia eléctrica la puesta en operación de los reactores Multietapa?
- ¿Cuál es el impacto de los reactores al Sistema Nacional Interconectado según las características y el tipo de funcionamiento de esta tecnología según lo comprobado mediante simulaciones?

### **3.4. Delimitación del problema**

En esta sección se describe la delimitaciones geográfica, contextual y temporal del diseño de investigación.

### **3.4.1. Delimitación geográfica**

Para la presente investigación se estará analizando la sección del Sistema Nacional Interconectado en el departamento de Huehuetenango, en los municipios de Chiantla y Santa Eulalia donde se encuentran las subestaciones Chiantla 230/69 kV y Covadonga 230 kV respectivamente, adicionalmente se tomará en cuenta la zona geográfica donde se encuentra la subestación Huehuetenango II, departamento de Quetzaltenango.

### **3.4.2. Delimitación contextual**

El contexto de la presente investigación se basará en estudios sobre la factibilidad de los equipos de compensación reactiva multietapa y su funcionamiento, para la presente investigación quedará a discreción del investigador la realización de diferentes escenarios para las simulaciones del sistema eléctrico en el área de influencia del proyecto.

### **3.4.3. Delimitación temporal**

La presente investigación estará tomando en cuenta las obras de generación y transmisión puestas en operación y activas a partir del año de emisión de la resolución CNEE-194-2019 y se realizarán simulaciones con las obras a partir del año de emisión de esta.



## 4. JUSTIFICACIÓN

La línea de investigación de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados que estará siendo abordada será la de nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica en su apartado de Análisis e impactos de la innovación tecnológica, lo anterior se deriva en que actualmente no existen Reactores Multietapas en Derivación en el Sistema Nacional Interconectado y tampoco en la región de Centroamérica, lo que convierte a Guatemala en pionera de la región en la implementación de esta tecnología.

Dentro de las razones más importantes para la realización del estudio de factibilidad se debe a que la ley general de electricidad de Guatemala estipula que deben de realizarse licitaciones de los planes de expansión a los sistemas de transmisión y de generación, si bien es de suma importancia el robustecer el sistema nacional interconectado y la red primaria de transmisión, cabe mencionar que el añadir elementos al sistema como generadores, transformadores sin que la demanda presente crecimiento, puede ocasionar eventos adversos como los que se estarán estudiando, como ser efectos de sobretensiones y de descompensación de potencia reactiva.

Adicionalmente el estudio del funcionamiento de equipos de tecnología no implementados a nivel regional provee un mejor panorama a la hora de la realización de planes de expansión, donde para escenarios similares al del objeto de este estudio puedan preverse e incluir dichos equipos dentro de estos planes.

Con el presente estudio los resultados esperados son el poder determinar el nivel de pérdidas, la confiabilidad del sistema, la regulación de tensiones previo

y posterior a la puesta en operación de los reactores, con los ejercicios de simulación mencionados en la sección de Metodología se podrá determinar lo anteriormente mencionado.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Establecer la factibilidad técnica la instalación de compensación reactiva mediante reactores multietapa en las subestaciones Chiantla 230/69 kV y Covadonga 230 kV.

### **5.2. Específicos**

- Determinar mediante simulaciones los niveles de tensión en los nodos a los que corresponden las subestaciones eléctricas Chiantla 230/69kV y Covadonga 230 kV y su área de influencia eléctrica con la a la implementación de las unidades de compensación reactiva multietapa.
- Comprobar los niveles de pérdidas antes y después de la instalación de los reactores multietapa.
- Establecer el nivel de Confiabilidad con la instalación de los reactores multietapa al sistema.
- Estudiar mediante simulaciones de flujos de carga el impacto de los reactores multietapas con cambiador de tomas bajo carga (OLTC) según las características y funcionamiento de esta tecnología no implementada anteriormente en el Sistema Nacional Interconectado.





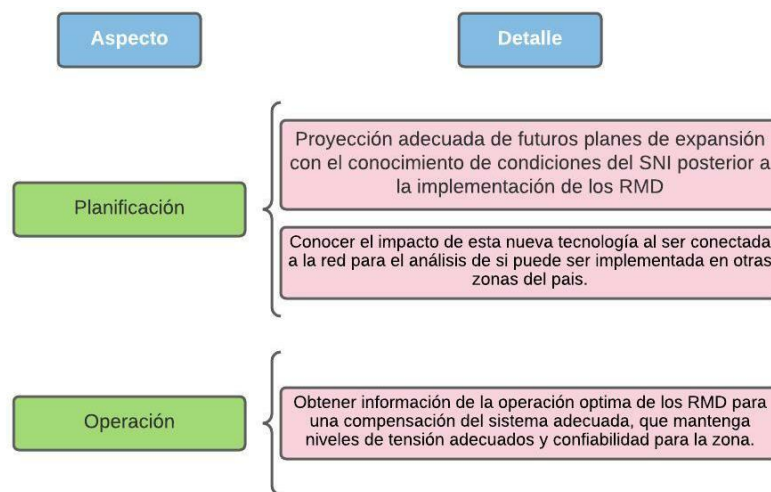
## 6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

En el presente diseño de investigación se estarán abordando temas puntuales e importantes como ser:

- Impacto de compensación reactiva para estabilidad del sistema.
- Implementación de tecnología de compensación de potencia reactiva mediante etapas variables nunca utilizada en la región de Centroamérica
- Condiciones actuales del sistema nacional interconectado en el área occidental del país y las sobretensiones de la zona.

Las necesidades puntuales para cubrir con el presente diseño de investigación se dividen de la siguiente forma:

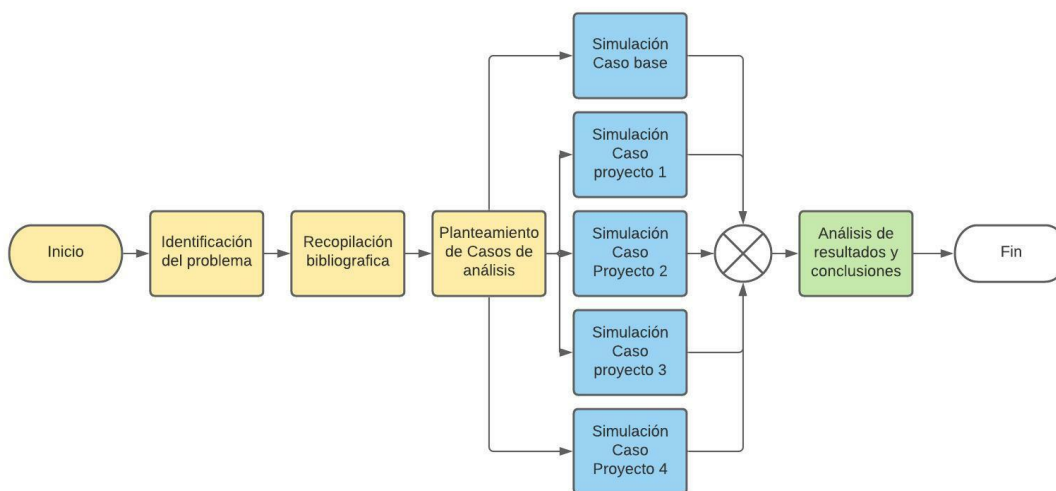
Figura 1. **Necesidades a cubrir**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint 365.

Derivado de lo anterior y al tratarse de un tema tan importante como ser la estabilidad de la red de transmisión, es de suma importancia conocer los efectos de equipos de compensación reactiva y así realizar la programación de actuación y de operación de estos equipos, el esquema de solución planteado para este diseño de investigación consiste en la utilización de la herramienta de simulación de flujos de potencia Software PSSE-E versión 33 y el esquema de solución es el siguiente:

Figura 2. **Esquema de solución de diseño de investigación**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint 365.

Mediante las diferentes fases de simulación se estarán realizando ejercicios de análisis de flujo de potencia, con diferentes escenarios donde se realizaran variaciones de la potencia reactiva compensada y se observará el comportamiento del voltaje, la obtención y documentación de los registros generados al momento de realizar estas simulaciones nos permitirá tener un panorama más claro de la factibilidad de estos equipos para el enriquecimiento

de la confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico de potencia en la zona de influencia.

Con la implementación de estos equipos de tecnología de compensación variable El SNI guatemalteco se convierte en pionero en cuanto a la implementación de equipos a nivel regional, lo que es de suma importancia para el mercado y la robustez del sistema, el estudio de la teoría como de la práctica y funcionamiento de tecnologías nuevas siempre es de suma importancia, puesto que con el pasar de los años los sistemas pueden verse en situaciones fuera de la vanguardia en cuanto al funcionamiento y confiabilidad se refiere.



## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. Elementos que componen los sistemas eléctricos de potencia

La finalidad de los sistemas eléctricos de potencia son generar, transportar y distribuir la energía eléctrica para abastecer la demanda de los consumidores, esto es posible mediante diferentes elementos que componen estos sistemas eléctricos. Equipos de protección, maniobra, estabilidad y adecuación para que los niveles de tensión y la potencia a suministrar se mantengan en los valores adecuados.

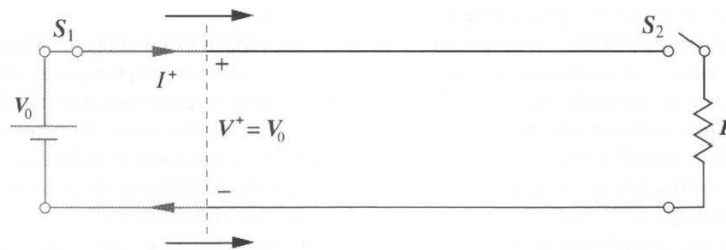
A continuación, se describen los principales elementos que componen un sistema eléctrico de transmisión.

#### 7.1.1. Líneas de transmisión

Como hacen mención Hayt y Buck (2006) estos elementos se utilizan para transmitir energía eléctrica y variedad de señales de un punto a otro, casi siempre desde una fuente a una carga. Cabe tomar en cuenta que a lo largo de una línea de transmisión deben de tomarse en cuenta ciertas características, Checa (1988) menciona las siguientes características principales por kilómetro:

- “Resistencia eléctrica [ohmios/km].
- Coeficiente de autoinducción o inductancia [henrios/km].
- Capacidad [faradios/km]
- Conductancia o perditancia [siemens/km]” (p. 1)

Figura 3. **Circuito básico de una línea de transmisión**



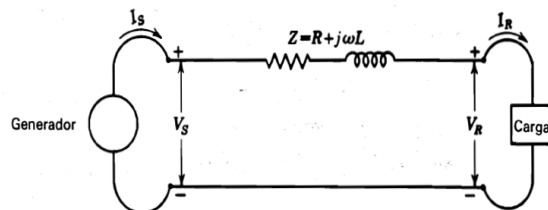
Fuente: Hayt y Buck. (2006). *Teoría electromagnética*.

Las líneas de transmisión según su distancia se clasifican como largas, medias y cortas, según Grainer y Stevenson (1996) consideran cortas las líneas de 60 Hz con longitud menor a 80 km, medias entre 80 y 240 km y largas superiores a los 240 km.

### 7.1.1.1. Línea de transmisión corta

En la línea de transmisión corta la impedancia de la línea es considerada en serie y  $Z$  es  $z\ell$  como mencionan Grainer y Stevenson (1996) la impedancia total de la línea, esto puede observarse en la siguiente ilustración del circuito equivalente:

Figura 4. **Circuito equivalente línea de transmisión corta**



Fuente: Grainer y Stevenson. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*.

Donde:

$I_S$  = corriente de emisor

$I_R$  = corriente de receptor

$Z$  = impedancia de la línea

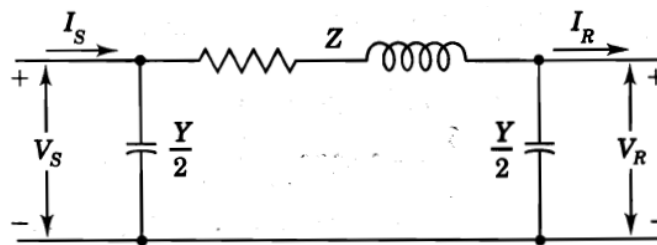
$V_S$  = voltaje del lado emisor

$V_R$  = voltaje del lado receptor

### 7.1.1.2. Línea de transmisión media

Para el caso de la línea de transmisión media las variables a analizar son la admitancia y la impedancia, adicionalmente según lo mencionado por parte de Grainer y Stevenson (1996) si el análisis de estas se realiza dividiendo en dos partes iguales la admitancia de manera paralela y se colocan la fuente y la carga, los cuales son llamados emisor y receptor correspondientemente se obtiene el modelo  $\pi$ , como se muestra en la siguiente figura:

Figura 5. Circuito equivalente línea de transmisión media



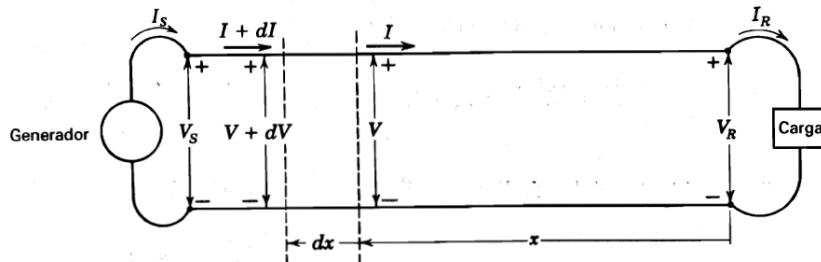
Fuente: Grainer y Stevenson. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*.

### 7.1.1.3. Línea de transmisión larga

El análisis del modelo de una línea de transmisión larga contempla variables complejas y su solución es mediante ecuaciones diferenciales, cabe

mencionar que estas son líneas con longitudes superiores a los 240 km y a una frecuencia de 60 Hz.

Figura 6. Diagrama esquemático de una línea de transmisión larga



Fuente: Grainer y Stevenson. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*.

No se profundizará en el análisis de este modelo de líneas ya que en la práctica las líneas de transmisión en la región de Centroamérica no alcanzan longitudes de líneas de transmisión largas.

### 7.1.2. Subestaciones eléctricas y equipos básicos

Tal y como hace mención Villegas (2003) en su obra las subestaciones son “la exteriorización física de un nodo de un sistema eléctrico de potencia, en el cual la energía se transforma a niveles adecuados de tensión para su transporte, distribución o consumo, con determinados requisitos de calidad”. (p.1)

Las subestaciones eléctricas están conformadas por equipos de protección, control y medida, así como equipos que tienen funciones adicionales como transformar la energía ya sea en niveles más altos o más bajos de tensión, según la necesidad y la función de la subestación. Dentro de los tipos según su función de subestaciones tenemos las siguientes:



- Elevadoras, las cuales elevan el voltaje para transmisión de los lugares de generación de energía hacia los lugares de distribución de la energía.
- Reductoras, la cual su principal función es el reducir el voltaje a un nivel de distribución para los usuarios finales.
- Subestaciones de maniobra, las cuales interconectan circuitos entre sí.

Las subestaciones eléctricas están compuestas por equipos con diferentes funciones, entre los principales como indica Villegas (2003) dentro de los equipos primarios y en alta tensión se encuentran los interruptores, equipos de medida, descargadores de sobretensiones (pararrayos) y seccionadores, para el caso de equipos secundarios podemos mencionar los equipos de control y de PCyM (Protección, control y medida) así como los equipos de servicios auxiliares y de comunicación.

#### **7.1.2.1. Interruptor de potencia**

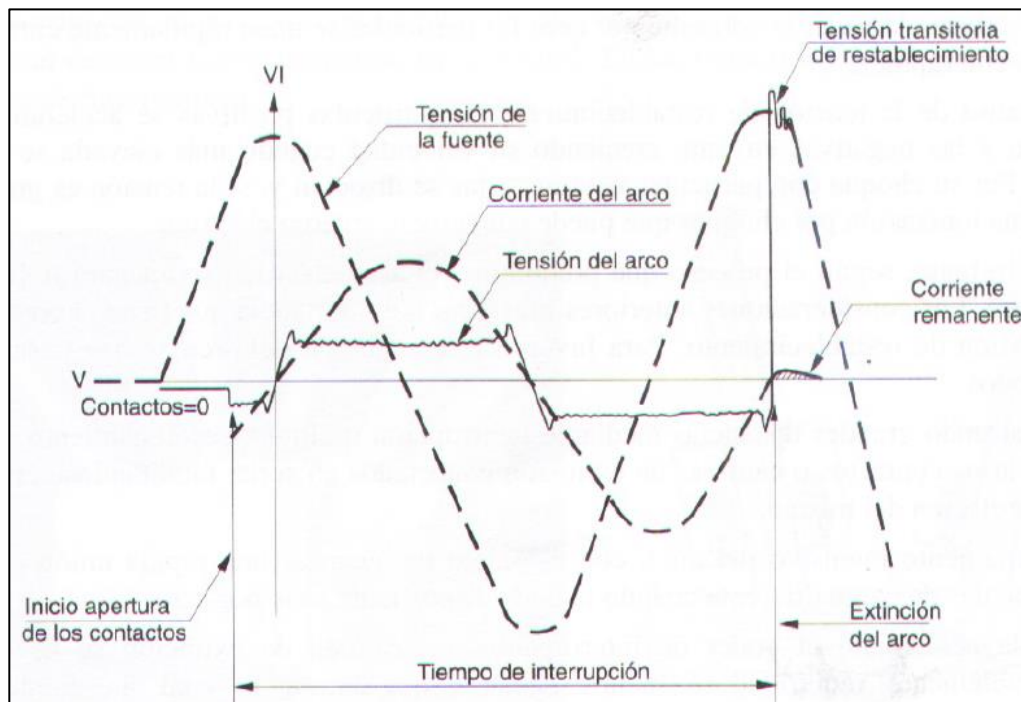
Los interruptores de potencia son:

Dispositivos mecánicos de interrupción capaces de conducir, interrumpir y establecer corrientes en condiciones normales, así como de conducir durante un tiempo especificado, interrumpir y establecer corrientes en condiciones anormales como son las de corto circuito. Su función básica es conectar o desconectar de un sistema o circuito energizado líneas de transmisión, transformadores, reactores o barrajes. (Villegas, 2003, p. 236).

Son equipos que, según su función, son el equipo más importante de la subestación, son elementos de maniobra y protección y son los que se encargan de abrir los circuitos de potencia en caso de fallas o contingencias. Es de suma

importancia que puedan soportar y realizar su operación de cierre o apertura bajo condiciones de estrés.

Figura 7. **Desarrollo de interrupción en una falla trifásica**



Fuente: Villegas. (2003). *Subestaciones de alta y extra alta tensión*.

Adicionalmente tienen la ventaja de poder operar bajo carga, cuentan con un sistema de extinción de arco eléctrico, el cual se forma al momento de querer realizar apertura de circuitos con carga conectada.

Figura 8. **Interruptor tripolar de potencia**



Fuente: [Fotografía de David Antonio López Orellana]. (Subestación Magdalena 230 kV, La Democracia, Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala.

Estos equipos según su mecanismo de operación pueden ser neumáticos, de resorte, hidráulicos o con Hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ).

#### **7.1.2.2. Seccionadores**

Equipos que como su nombre indica se encargan de seccionar circuitos por necesidad o como hace mención en su obra Villegas (2003) también pueden ser utilizados para aislar líneas de transmisión, bahías de transformación y bahías de compensación reactiva por trabajos de mantenimiento en las subestaciones o en las líneas de transmisión.

Villegas (2003) describió la clasificación de estos equipos según su construcción y forma de operación se clasifican en:

- “Seccionadores de apertura central.
- Seccionadores de doble apertura.
- Seccionadores de apertura vertical.
- Seccionadores tipo pantógrafo y semipantógrafo” (p. 257-258).

Figura 9. **Seccionadores de línea de apertura central**



Fuente: [Fotografía de David Antonio López Orellana]. (Subestación Magdalena 230 kV, La Democracia, Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala.

### **7.1.2.3. Transformadores de tensión**

Son equipos de medición, y las funciones como enumera Villegas (2003), son principalmente las siguientes:

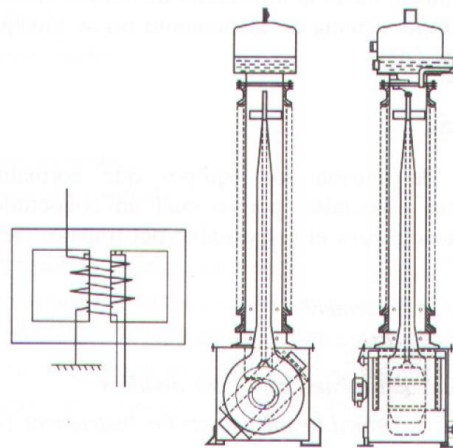
- Aislar el circuito de baja tensión (secundario) del circuito de alta tensión (primario).

- Procurar que los efectos transitorios y de régimen permanente aplicados al circuito de alta tensión sean reproducidos lo más fielmente posible en el circuito de baja tensión (p.267).

Adicionalmente estos equipos se dividen en dos según su construcción y son:

- Transformadores de tensión inductivos: según Villegas (2003), son equipos que son para conexiones de fase – tierra o fase – fase, estos equipos son utilizados en la mayor de lo casos para aplicaciones en media tensión.

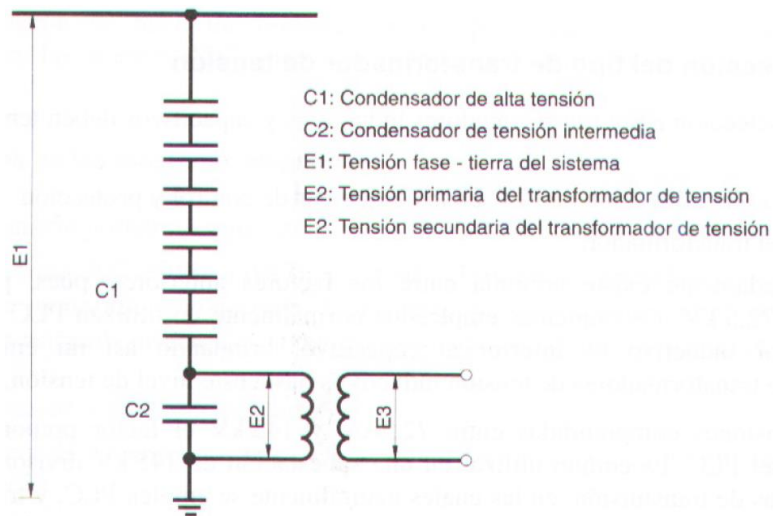
Figura 10. **Transformador de tensión inductivo**



Fuente: Villegas. (2003). *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión*.

- Transformadores de tensión capacitivos: en este caso según menciona Villegas (2003), se trata de dispositivos normalmente utilizados para aplicaciones donde se utilizan funciones de comunicación, esto derivado de su división capacitiva utilizada para diferentes señales.

Figura 11. **Circuito interno transformador de tensión capacitivo**



Fuente: Villegas. (2003). *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión*.

Figura 12. **Transformador de potencial capacitivo**



Fuente: [Fotografía de David Antonio López Orellana]. (Subestación Magdalena 230 kV, La Democracia, Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala.

#### **7.1.2.4. Transformadores de corriente**

Los transformadores de corriente son utilizados para:

Efectuar las mediciones de corriente en sistemas eléctricos. Tienen su devanado primario conectado en serie con el circuito de alta tensión. La impedancia del transformador de corriente vista desde el lado del devanado primario, es despreciable comparada con la del sistema en el cual estará instalado, aun así, si se tiene en cuenta la carga que se conecta en su secundario. En esta forma la corriente que circulara en el primario de los transformadores de corriente está determinada por el circuito de potencia. (Villegas, 2003, p. 278)

Figura 13. **Trasformador de corriente**



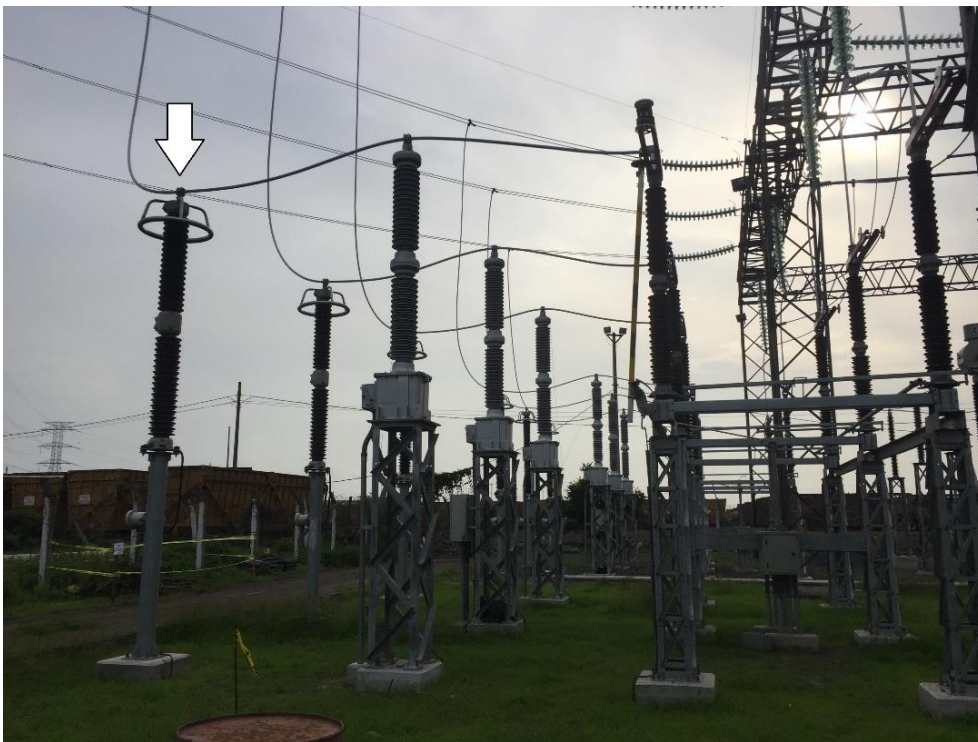
Fuente: [Fotografía de David Antonio López Orellana]. (Subestación Magdalena 230 kV, La Democracia, Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala.

### 7.1.2.5. Pararrayos

Los pararrayos son equipos de protección para las sobretensiones, como hace mención Villegas (2003) estos elementos solían ser fabricados con descargadores y resistencias de carburo de silicio (SiC) no lineales, sin embargo, en la actualidad estos elementos son construidos con resistencias no lineales de óxido de zinc (ZnO) dejando de lado los descargadores.

Es de suma importancia que estos son los primeros equipos instalados en la bahía de una subestación, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 14. Pararrayos



Fuente: [Fotografía de David Antonio López Orellana]. (Subestación Magdalena 230 kV, La Democracia, Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala.



### **7.1.3. Transporte de energía eléctrica**

La actividad de transmisión o transporte de energía es la encargada de llevar la energía eléctrica de los lugares de generación hasta el lugar de distribución para el uso de esta.

Los grandes centros de consumo de energía se encuentran principalmente en las grandes urbes y las centrales de generación en el interior del país, es por eso por lo que el transporte de energía juega un papel importante en el sistema.

Actualmente en el país las empresas que prestan el servicio de transporte de energía son:

- Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica (ETCEE-INDE).
- Transportista Eléctrica Centroamericana, S.A. (TRELEC)
- DUKE Energy International Transmisión Guatemala, Limitada.
- Redes Eléctricas de Centroamérica S.A. (RECSA).
- Transporte de Electricidad de Occidente (TREO).
- Transmisora de Energía Renovable, S.A. (TRANSNOVA).
- Transportadora de Energía de Centroamérica, S.A. (TRECASA).

Es importante mencionar que al momento de realizar la transmisión o transporte de energía se presentan diferentes sucesos electromagnéticos en las líneas de transmisión según las condiciones del sistema y de la operación del sistema.

## **7.2. Parámetros del sistema**

A continuación, se describen los parámetros del sistema.

### 7.2.1. Potencia activa

Es la potencia útil, es decir la potencia utilizada del sistema para realizar un trabajo, medida en Watts y que en un circuito trifásico se define de la siguiente forma:

$$P = \sqrt{3}V * I * \cos\theta$$

Donde:

V = voltaje

I= corriente

$\theta$ = ángulo entre el voltaje y la corriente

Esta potencia es definida con la letra P y su unidad de medida es el vatio (watts) [W], comúnmente y en el día a día los trabajos realizados por esta potencia son los que en la práctica se traducen como por ejemplo en trabajos mecánicos, trabajos lumínicos, trabajos térmicos, trabajos químicos, etc.

### 7.2.2. Potencia reactiva

Es la potencia consumida por los circuitos de corriente alterna en las cuales se encuentran cargas reactivas conectadas, como ser estatores de máquinas de generación, transformadores de potencia y cualquier otro dispositivo que cuente con arrollamientos de cobre o bobinas. Esta potencia no produce ningún tipo de trabajo útil, sin embargo, esta potencia es necesaria para la producción del campo magnético con el cual funcionan, la potencia reactiva está definida por la siguiente ecuación:

$$Q = \sqrt{3}V * I * \sin\theta$$

Donde:

Q = potencia reactiva (VAR).

V = voltaje

I= corriente

$\theta$ = ángulo entre el voltaje y la corriente

### **7.2.3. Potencia aparente**

También llamada potencia total, es la realmente suministrada por un generador o planta de generación, que se deriva de la suma geométrica de la potencia reactiva y activa y la cual se define como:

$$S = P + jQ$$

$$S = VI^* = |V||I| \cos(\alpha - \beta) + j|V||I| \sin(\alpha - \beta)$$

### **7.2.4. Niveles de tensión**

Los niveles de tensión de los sistemas de transmisión de energía suelen verse afectados ya sea en decaimiento o aumento derivado de diferentes sucesos y/o efectos electromagnéticos, para el presente estudio y el caso particular que se estará abordando son el efecto de sobretensiones causado por las adición de líneas de transmisión de longitud medianamente considerable para el territorio de Guatemala, adicional a eso cabe mencionar que la baja demanda en zonas de generación conlleva efectos de sobretensión.

Las tolerancias permisibles para los sistemas de transmisión en Guatemala están establecidas en las Normas Técnicas de Calidad del Servicio

de Transporte y Sanciones (NTCSTS) (2009) y hacen vínculo con el Artículo 24 de las (NTSD) (1999).

Artículo 24. Tolerancias para la Regulación de Tensión de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) (1999). En el cual se establecen las tolerancias.

- Tolerancias de los índices individuales. Las tolerancias admitidas en la desviación porcentual, respecto de las tensiones nominales en los puntos de entrega de energía eléctrica, serán las indicadas en cada una de las Etapas de Transición y Régimen.

Tabla I. **Tolerancia admisible respecto del valor nominal, en porcentaje**

TENSION	TOLERANCIA ADMISIBLE RESPECTO DEL VALOR NOMINAL, EN %					
	ETAPA					
	TRANSICION		REGIMEN A partir del Mes 1 hasta el 12		REGIMEN A partir del Mes 13	
	SERVICIO URBANO	SERVICIO RURAL	SERVICIO O URBANO	SERVICIO O RURAL	SERVICIO URBANO	SERVICIO RURAL
BAJA	12	15	10	12	8	10
MEDIA	10	13	8	10	6	7
ALTA	TRANSICION		REGIMEN A partir del Mes 1 hasta el 12		REGIMEN A partir del Mes 13	
	7		6		5	

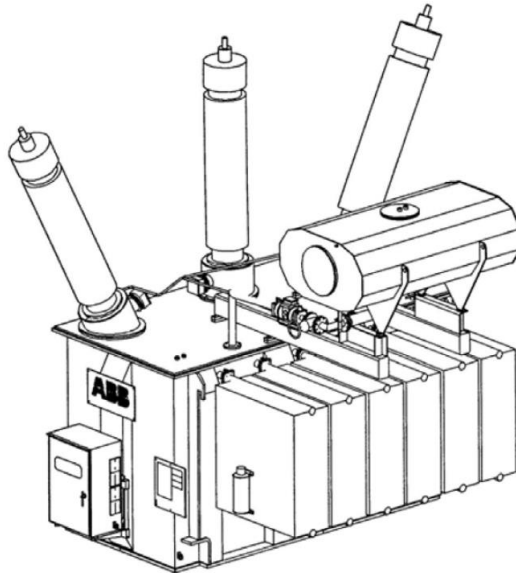
Fuente: CNEE. (1999). *Normas Técnicas del Servicio de Distribución -NTSD-*. Consultado del 15 de agosto de 2021. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/03%20NTSD.pdf>.

### **7.3. Reactores Multietapa en Derivación (RMD)**

Los reactores variables en derivación son equipos de compensación de potencia reactiva que es un equipo consumidor de energía reactiva. En algunas aplicaciones, existe la necesidad de consumir la potencia reactiva inductiva en pasos. En tal caso, se necesitan varias unidades de reactores de derivación para conectarse y desconectarse con frecuencia, lo que requiere más interruptores de circuito y huellas en la subestación. En lugar de tener varias unidades, una unidad que cubra todo el rango de potencia podría ser una solución económica. (Khorami, 2011, p. 34).

Son equipos que se utilizan ampliamente en redes de transmisión y distribución, consumen potencia reactiva lo que conlleva la disminución en los valores de voltaje en caso de que el sistema presente sobretensiones. Físicamente estos equipos podrían confundirse con un transformador, sin embargo, Khorami (2011) hace énfasis en que a diferencia de un transformador que cuenta con tres terminales del lado de alta tensión y tres terminales del lado de baja tensión, los reactores en derivación únicamente cuentan con tres conexiones de voltaje como en la siguiente figura:

Figura 15. **Ejemplo de forma física de un reactor multietapa en derivación**

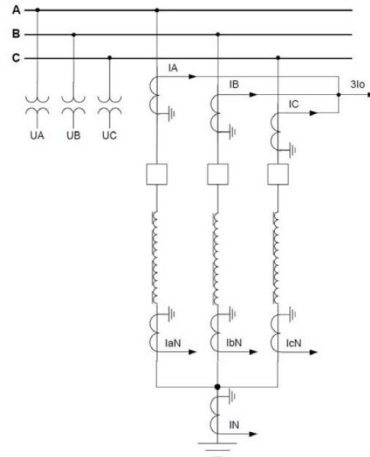


Fuente: Khorami, M. (2011). *Application Fields and Control Principles of Variable Shunt Reactors with Tap-Changer*. Consultado el 2 de septiembre de 2021. Recuperado de: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174457/174457.pdf>.

Adicionalmente se puede tomar en cuenta que un reactor variable en derivación es un reactor donde la inductancia puede variar en pasos, similar al caso de los transformadores de potencia con cambiador de tomas bajo carga, el funcionamiento de este equipo consiste en que puede aumentar hasta el doble de su valor inicial dentro del rango de regulación para la compensación reactiva.

La conexión de estos equipos a la red se realiza en paralelo por lo que comúnmente se menciona que estos equipos están conectados directamente a la línea de transmisión:

Figura 16. **Ejemplo de un reactor en derivación conectado a una línea de transmisión**



Fuente: Khorami, M. (2011). *Application Fields and Control Principles of Variable Shunt Reactors with Tap-Changer*. Consultado el 2 de septiembre de 2021. Recuperado de: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174457/174457.pdf>.

### 7.3.1. Aplicaciones de los Reactores Multietapas en Derivación

La primera función que Khorami (2011) menciona de los Reactores Variables en Derivación son la de reducir los picos de voltaje en la red eléctrica por maniobras, lo que normalmente se conoce como sobretensiones de maniobra.

Adicionalmente Khorami (2011) indica que estos equipos son utilizados en los parques de generación eólica, donde se utilizan para controlar las fluctuaciones de potencia reactiva, para la corrección de estas fluctuaciones con reactores estáticos o fijos se requieren muchas acciones para la conmutación por lo que los reactores variables o multietapas en derivación representa una solución adecuada a estas situaciones.

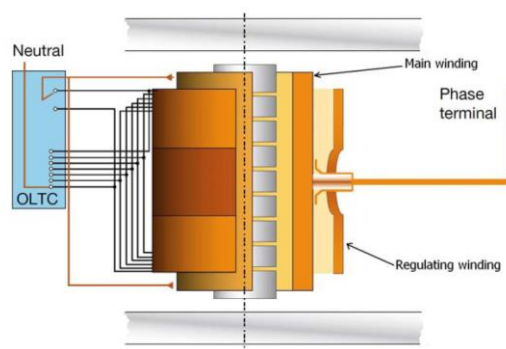
Khorami (2011) en su obra nos menciona que otras de las principales aplicaciones de estos equipos es cuando el sistema cuenta con baja demanda de energía eléctrica, estos equipos cumplen con el objeto de regular la tensión.

### 7.3.2. Aspectos constructivos de los reactores multietapa en derivación

Estos equipos utilizan un devanado separado por etapas para realizar la regulación de potencia reactiva, la potencia reactiva mínima está limitada por la longitud física del devanado de regulación.

Como hace mención Khorami (2011) la división de los devanados es lo que nos permite tener regulación variable de potencia reactiva, estos devanados se conectan como se muestra en la siguiente figura al cambiador de tomas bajo carga OLTC.

Figura 17. **Diseño principal de la parte activa de un RMD**

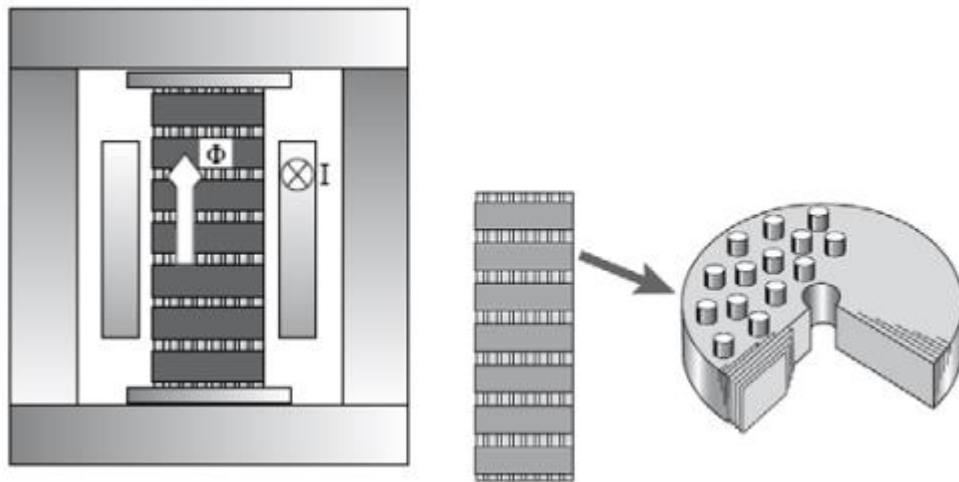


Fuente: Khorami, M. (2011). *Application Fields and Control Principles of Variable Shunt Reactors with Tap-Changer*. Consultado el 2 de septiembre de 2021. Recuperado de: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174457/174457.pdf>.



En su mayoría estos equipos son de un concepto con núcleo con huecos derivado que es lo que actualmente se encuentra en el mercado, como mencionan Bengtsson, Ryen, Rui y Olsson (2014) “Las ramas del núcleo con huecos están construidas con segmentos de núcleo cilíndricos” algo que podemos observar en la siguiente imagen:

Figura 18. **Concepto de núcleo con espacio libre monofásico**



Fuente: Bengtsson, Ryen, Rui y Olsson. (2014). *Variable shunt reactors: applications and system aspects*. Consultado el 2 de agosto de 2021. Recuperado de [https://library.e.abb.com/public/0583f43ed8dc4d8c83dc28fb13f7bfca/Variable%20Shunt%20Reactors\\_Cigre2014\\_A2\\_211\\_2014.pdf](https://library.e.abb.com/public/0583f43ed8dc4d8c83dc28fb13f7bfca/Variable%20Shunt%20Reactors_Cigre2014_A2_211_2014.pdf).

Estos equipos al igual que los transformadores de potencia cuentan con una parte activa y bujes de alta tensión los cuales se conectan a la barra de la subestación y así realizar la compensación de potencia reactiva, en la siguiente imagen se ilustra el reactor instalado en la subestación Chiantla:

Figura 19. **Reactor Multietapa en Derivación subestación Chiantla**



Fuente: [Fotografía de David Antonio López Orellana]. (Subestación Chiantla 230/69 kV, Chiantla, Huehuetenango. 2021). Colección particular. Guatemala.

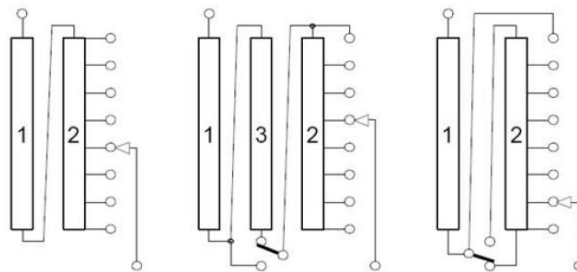
### **7.3.3. Control y operación de los reactores multietapa en derivación**

Estos equipos cuentan con devanados seccionados según las necesidades de aplicación, es decir, los pasos de regulación varían según los requerimientos del cliente al fabricante, el conmutador bajo carga varía según la programación del relé de regulación con los parámetros establecidos de potencia reactiva y voltaje.

En su investigación Khorami (2011) menciona lo importante que es tener en cuenta la cantidad de pasos y de regulación que tendrá el reactor multietapa en derivación, cabe mencionar que para el presente diseño de investigación en

las simulaciones se estará analizando con reactores multietapa en derivación con un mínimo de 3 pasos de 10 MVar, lo que equivale a una compensación máxima de reactiva de 30 MVar, en la siguiente imagen podemos observar los tipos de diseño de conmutación de reactores multietapa en derivación:

Figura 20. **Tipos de regulación de un reactor multietapa en derivación**



Fuente: Khorami, M. (2011). *Application Fields and Control Principles of Variable Shunt Reactors with Tap-Changer*.

Es importante recalcar que la máxima capacidad de regulación esta amarrada al nivel de tensión al cual estará conectado el reactor.

Figura 21. **Rango factible de regulación dependiendo de su voltaje**



Fuente: Khorami, M. (2011). *Application Fields and Control Principles of Variable Shunt Reactors with Tap-Changer*.

## **7.4. Análisis de flujos de potencia**

En esta sección abordaremos la teoría de análisis de flujos de potencia. Es de suma importancia para el entendimiento de la modulación de los sistemas eléctricos de potencia y simulaciones el entender los modelos matemáticos a utilizar para estos análisis.

### **7.4.1. Teoría de análisis de flujos de potencia**

El análisis de flujos de potencia puede llevarse a cabo mediante simulaciones realizadas con herramientas informáticas, en la actualidad estas herramientas permiten a los ingenieros encargados de la explotación y planificación de los SEP contar con un amplio panorama de cómo se comportará la red según la proyección de crecimiento.

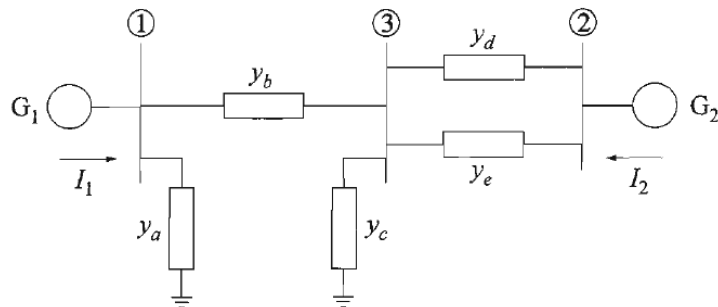
Tal y como indican Grainer y Stevenson (1996) “La información principalmente que se obtiene de un flujo de potencia es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada barra y las potencias real y reactiva que fluyen en cada línea”. (p. 309)

Adicionalmente cabe mencionar que para la resolución de flujos de potencia es de suma importancia tomar en cuenta las características de la tipología del SEP, la cantidad de subestaciones o nodos y las longitudes de las líneas energizadas o en operación comercial, para el presente estudio se estarán realizando simulaciones con la base de datos y las premisas del Administrador del mercado mayorista actualizadas hasta el año 2020.

Grainer y Stevenson (1996) en su obra mencionan que para la solución de análisis de flujos de potencia se pueden utilizar admitancias propias y mutuas

que componen la matriz de admitancias de una barra  $Y_{\text{barra}}$  o de igual manera se podrían utilizar las impedancias de un punto de transferencia y de operación que confirman  $Z_{\text{barra}}$ , en la siguiente figura se muestra el ejemplo de un diagrama.

Figura 22. Diagrama de tres barras



Fuente: Kundur. (1994). *Power System Stability and Control*.

El análisis numérico del presente diseño de investigación será realizado mediante el método de Newton-Raphson que Grainer y Stevenson (1996) describen en su obra como una solución para el análisis y la solución de dos o más ecuaciones y dos variables.

A su vez, Kundur (1994) menciona que para la realización de los análisis de flujos de potencia o flujos de carga como también se les conoce, es necesario partir de la clasificación de las barras o buses, a estas barras se encuentran asociadas cuatro (4) magnitudes importantes a tomar en cuenta las cuales son:

- Potencia activa      P
- Potencia reactiva    Q
- Magnitud de voltaje    V
- Angulo de voltaje     $\theta$

Kundur (1994) establece que las buses, barra o nodos de conexión se clasifican como:

- Barra de voltaje controlado
- Barra de carga
- Slack

El análisis numérico implementado en el presente diseño de investigación es el método como anteriormente se mencionó de N-R, este procedimiento algorítmico que permite encontrar el inicio o raíz de una función o ecuación, es importante hacer mención que se trata de un método iterativo y abierto.

Teorema de Newton Raphson

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0)$$

donde se debe de buscar el punto donde  $f(x_1) = 0$  entonces:

$$0 = f(x_0) + (x_1 - x_0)f'(x_0)$$

Por lo que puede concluirse que

$$X_1 \approx X_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Y de una forma general

$$X_{n+1} \approx X_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SIMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS  
ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Elementos que componen los SEP

##### 1.1.1. Líneas de transmisión

1.1.1.1. Línea de transmisión corta

1.1.1.2. Línea de transmisión media

1.1.1.3. Línea de transmisión larga

##### 1.1.2. Subestaciones eléctricas y equipos básicos

1.1.2.1. Interruptor de potencia

1.1.2.2. Seccionadores

1.1.2.3. Transformadores de potencial

1.1.2.4. Transformadores de corriente

1.1.2.5. Pararrayos

##### 1.1.3. Transporte de energía eléctrica

#### 1.2. Parámetros del sistema

- 1.2.1. Potencia activa
- 1.2.2. Potencia reactiva
- 1.2.3. Potencia aparente
- 1.2.4. Niveles de tensión
- 1.3. Reactores Multietapa en Derivación (RMD)
  - 1.3.1. Aplicaciones de los RMD
  - 1.3.2. Aspectos constructivos de los RMD
  - 1.3.3. Control y operación de los RMD
- 1.4. Análisis de flujos de potencia
  - 1.4.1. Teoría de flujos de potencia

## 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 2.1. Características del estudio
  - 2.1.1. Unidad de análisis
  - 2.1.2. Variables
- 2.2. Fases del estudio
  - 2.2.1. Fase 1. Recopilación bibliográfica, Planteamiento y armado de casos de análisis mediante simulaciones
  - 2.2.2. Fase 2. Realización de simulaciones
    - 2.2.2.1. Fase 2.1. Simulaciones para el análisis de tensión
    - 2.2.2.2. Fase 2.2. Simulaciones para el análisis de valores de perdidas
    - 2.2.2.3. Fase 2.3. Simulaciones para el análisis de confiabilidad
    - 2.2.2.4. Fase 2.4. Simulaciones para el análisis de características y funcionamiento de los RMD



### 3. REALIZACIÓN DE SIMULACIONES

- 3.1. Simulación caso Base
- 3.2. Simulaciones caso proyecto 1
- 3.3. Simulaciones caso proyecto 2
- 3.4. Simulaciones caso proyecto 3
- 3.5. Simulaciones caso proyecto 4
- 3.6. Simulación de contingencias

### 4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

- 4.1. Resultados niveles de voltaje
- 4.2. Resultados valores de pérdidas
- 4.3. Resultados de análisis de confiabilidad
- 4.4. Resultado de análisis de características y funcionamiento RMD

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ANEXOS



## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. Características del estudio

En esta sección estaremos estableciendo las características del tema de investigación, lo que nos permitirá tener un panorama amplio y objetivo de lo que se estará realizando, para este estudio las características principales son:

- Alcance correlacional: esto debido a que mediante software de simulaciones para el análisis de flujos de potencia y la implementación de métodos numéricos relacionados con la compensación reactiva y la regulación de tensión, se estudiará la relación de compensación de potencia reactiva y su efecto en los niveles de tensión en las líneas y nodos de la zona.
- Enfoque cuantitativo: esto debido que se realizaran estudios eléctricos y simulaciones mediante software, para observar y medir los valores numéricos de las siguientes variables:
  - Voltaje.
  - Potencia activa.
  - Potencia reactiva.
  - Pérdidas
- Diseño cuasiexperimental: debido a que no se manipularan como tal los Reactores Multietapa En Derivación y se realizaran simulaciones de estos, se establece este tipo de diseño.

### **9.1.1. Unidades de análisis**

La unidad de análisis del estudio serán las empresas transportistas del área y las subestaciones eléctricas pertenecientes a estos, las cuales se encuentran en el área asociada donde se estará realizando la instalación de los reactores de compensación reactiva multietapa, en la investigación se estará estudiando el fenómeno de compensación reactiva en los nodos y líneas de transmisión de la zona de influencia.

### **9.1.2. Variables**

La presente investigación se estará realizando mediante un diseño cuasiexperimental, donde el estudio correlacional de las variables a analizar las determinará los resultados que nos manifiesten la factibilidad de la instalación de las unidades de compensación reactiva multietapas, las variables principales de la investigación son:

- Potencia activa, medida en mega watts [MW]
- Potencia reactiva, medida en mega voltamperio reactivo [MVA<sub>r</sub>]
- Perdidas del sistema, medidas en kilowatts [kW]
- Voltaje o tensión la cual es medida en kV, con el rango de permisibilidad establecido por la CNEE para 230 kV.

Tabla II. **Variables**

CRITERIO Variable	NUMÉRICO				
	Discreta	Continua	Manipulable	Observable	Nivel de medición
Potencia activa		x	x	x	Razón
Potencia reactiva		x	x	x	Razón
Voltaje		x		x	Razón
Pérdidas		x		x	Razón

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 365.

Es necesario analizar la potencia activa inyectada a la red por parte de los generadores de la zona de influencia del proyecto, de igual manera determinar el rango de perdidas en el sistema previo y post a la instalación de los reactores multietapa en derivación.

Pero si algo es de suma importancia es el observar y analizar la correlación que estará siendo manifestada entre la potencia reactiva y los niveles de voltaje o tensión en la zona con la operación de los reactores multietapa en derivación.

Tabla III. **Definición de variables**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Potencia activa	Capacidad de un circuito para transformar la energía eléctrica en un trabajo, es la potencia útil del sistema.	En la operación la potencia activa es la que inyecta a la red un generador eléctrico y que se suministra a los consumidores o usuarios finales que convierten en trabajo, medida en Watts o para el presente estudio kilo Watts [kW] o Mega Watts [MW].
Potencia Reactiva	Es la potencia que consumen los circuitos eléctricos que constan de máquinas con bobinas o cargas capacitivas.	En la práctica este tipo de potencia se considera nula e inútil, no produce ningún y que no produce ningún tipo de trabajo, sin embargo, es de suma importancia el mencionar que esta potencia es necesaria para la producción de los campos magnéticos para el funcionamiento de los equipos como ser transformadores, motores y generadores. Su unidad de medida es el voltamperio reactivo [VAR].

Continuación de la tabla III.

Pérdidas	Las pérdidas eléctricas en general se traducen de cierta forma en pérdidas financieras para empresas, ya sea en transformación o distribución, estos efectos pueden ocasionarse por diferentes razones que afecten el sistema o por condiciones naturales de las máquinas de generación, elementos de transporte de energía y/o factores externos.	En la práctica las pérdidas están amarradas a condiciones como ser las pérdidas terminales (en forma de calor) pérdidas magnéticas de las máquinas para lograr la magnetización requerida para el efecto de su función principal. Su unidad de medida es en kilo watts [kW].
Voltaje	El voltaje es una fuerza por unidad de carga que ejerce un campo eléctrico sobre una partícula con carga para llevarla de un punto a otro.	En la práctica es una unidad vectorial que cuenta con una magnitud y dirección angular que se genera a un valor determinado y se transforma para su transporte y su uso final, comúnmente se conoce como la fuerza para empujar la corriente por un determinado medio conductor y así realizar el trabajo, su unidad de medida es el voltio [V].

Fuente: elaboración propia, Microsoft Excel 365.

## 9.2. Fases del estudio

A continuación, se describen las diferentes fases del estudio, los cuales son necesarios para el desarrollo de la investigación.

### 9.2.1. Fase 1: recopilación bibliográfica, Planteamiento y armado de casos de análisis mediante simulaciones

En esta fase se intenta recopilar la mayor cantidad de información teórica y fuentes bibliográficas de los puntos más importantes a tratar en el presente estudio que son:

- Sistema Nacional Interconectado (SNI).
- Operación del SNI.
- Reactores Multietapa en Derivación, características y funcionamiento.
- Base de datos del Sistema Nacional Interconectado para carga a software de simulaciones.
- Regulación de voltaje mediante compensación reactiva.
- Análisis de flujos de potencia

Existe información del Sistema Nacional Interconectado y las bases de datos de las obras actualmente en operación, las llamadas premisas del sistema son información de dominio público siempre y cuando se justifique la solicitud de esta información a los entes regulador y operador del mercado eléctrico de Guatemala.

La teoría de la compensación reactiva y el comportamiento del voltaje ante diferentes escenarios de compensación reactiva nula, compensación de una bahía y luego compensación reactiva en ambos extremos del punto de análisis nos lo definen los textos de teoría electromagnética y análisis de sistemas de potencia.

De los equipos de compensación reactiva se cuentan con *brochure* de fabricantes de estos equipos y se ha logrado la recopilación de más información con los mismos fabricantes y contactos comerciales de empresas.

Posterior del ordenamiento y clasificación de la información teórica necesaria se estará armando un marco teórico básico y necesario donde se expliquen los puntos más importantes mencionados en el numeral anterior.

Es de suma importancia el entender los principios básicos de compensación reactiva. Adicionalmente el encontrarse familiarizado con el sistema eléctrico y las obras de transmisión es de suma importancia para al momento de realizar las simulaciones mediante software no se escape un detalle de operación del sistema.

Con las variables anteriormente mencionadas se estarán realizando simulaciones manipulando los valores de potencia activa y en su mayoría la potencia reactiva, los casos a armar en el software de simulación se describen a continuación:

- Caso base: análisis de los flujos de potencia del sistema en la zona de occidente del país sin la implementación de la subestación Chiantla.
- Caso proyecto 1: únicamente construida y puesta en operación la subestación Chiantla con las líneas de transmisión Chiantla – Covadonga 230 kV y Chiantla – Huehuetenango II 230 kV energizadas.
- Caso Proyecto 2: construida y energizada la subestación Chiantla y sus líneas de transmisión Chiantla – Covadonga 230 kV y Chiantla – Huehuetenango II 230 kV igualmente energizadas, y en operación la bahía de compensación reactiva de esta subestación con el funcionamiento del reactor multietapa.
- Caso proyecto 3: construida y energizada la subestación Chiantla y sus líneas de transmisión Chiantla – Covadonga 230 kV y Chiantla – Huehuetenango II 230 kV igualmente energizadas, y en operación la bahía de compensación reactiva de la subestación Covadonga con el funcionamiento del reactor multietapa.
- Caso Proyecto 4: construida y energizada la subestación Chiantla y sus líneas de transmisión Chiantla – Covadonga 230 kV y Chiantla – Huehuetenango II 230 kV igualmente energizadas, y en operación las dos



bahías de compensación reactiva, en subestación Chiantla y en subestación Covadonga.

### **9.2.2. Fase 2: realización de simulaciones**

Luego de la recopilación de información y el establecimiento de los casos de análisis, se estarán realizando las simulaciones para los diferentes casos mencionados. Estas simulaciones contarán con variaciones en las variables manipulables de la siguiente forma:

- **Potencia activa:** se realizarán variaciones en los diferentes casos variando la potencia activa tanto de generación inyectada a la red como variación de potencia activa en las barras de las subestaciones asociadas que tengan carga conectada.
- **Potencia reactiva:** se realizarán variaciones en la potencia reactiva compensada por los reactores según el caso que corresponda, de tal manera que se puedan observar las variaciones en el voltaje y las pérdidas del sistema.

Es importante mencionar que estas simulaciones se realizarán para cada uno de los casos mencionados anteriormente.

#### **9.2.2.1. Fase 2.1. Simulaciones para el análisis de tensión**

En estas simulaciones estaremos observando detenidamente los valores de tensión de las barras de las subestaciones Chiantla, Huehuetenango II y Covadonga, según se varíen las variables antes mencionadas, para esta fase

estaremos analizando que los valores de voltaje si se encuentren dentro del rango permitido por la normativa vigente del país.

#### **9.2.2.2. Fase 2.2. simulaciones para el análisis de valores de perdidas**

Como su nombre lo menciona, en la fase de análisis de pérdidas se determinará si los valores de perdidas en el sistema en la zona occidental del país presentan un aumento o una disminución posterior a la simulación de operación de los Reactores Multietapa en Derivación. De igual manera es importante mencionar que el análisis de perdidas toma un carácter de suma importancia ya que estas pérdidas pueden convertirse en cobros a las empresas transportistas.

#### **9.2.2.3. Fase 2.3. simulaciones para el análisis de confiabilidad**

El análisis de confiabilidad en la zona posterior a la implementación de los Reactores Multietapa en Derivación se realizará mediante simulación efectos de baja demanda y alta inyección de generación, esto provoca sobretensiones y aperturas de las líneas de transmisión por los parámetros de protección, los cuales son establecidos por la normativa. Al momento de realizar esta simulación de efectos adversos, podremos observar el comportamiento de los reactores en respuesta automática para compensar reactiva y regular el voltaje.

#### **9.2.2.4. Fase 2.4. simulaciones para el análisis de características y funcionamiento de los RMD**

Como ya se ha hecho mención en otros apartados del presente diseño de investigación, actualmente en la región de Centroamérica no se encuentran implementados equipos de compensación reactiva multietapas, la operación y funcionalidad de estos equipos es abordada de manera teórica en el marco teórico, sin embargo, dado que son equipos con cambiadores de toma bajo carga automáticos, mediante simulaciones de descompensación se estará observando y estudiando la operación programada de los RMD en cuanto a la variación de sus etapas de compensación. Siempre es de suma importancia el implementar nuevas tecnologías a la red eléctrica del país, por eso el entendimiento mediante un diseño cuasiexperimental de cómo funcionan y operan estos equipos es un aporte positivo para futuros planes de expansión.

### **9.3. Resultados esperados e interpretación**

Posterior a la realización de las corridas y simulaciones en PSS-E se realizará la interpretación de los datos, es decir, mediante la tabulación de los diferentes valores de voltaje según la compensación reactiva se determinará la factibilidad de la instalación de los reactores multietapa.

Se espera que las pérdidas por efecto Joule en el sistema tiendan a reducirse levemente y de manera estacional, esto debido que se incorporará al sistema elementos pasivos y la configuración de demanda y oferta varía estacionalmente.

Los resultados esperados son que las variaciones de voltaje en las tres barras, subestaciones o nodos que se estarán abordando en el presente diseño de investigación, se encuentren en los rangos permisibles por la CNEE para el servicio de transmisión, mediante el análisis de contingencias con base en lo establecido por el AMM en el informe de la información de largo plazo se determinará el incremento en la confiabilidad del sistema derivado de la instalación de los RMD.

Según la teoría antes expuesta en cuanto a la implementación de los RMD se espera que los valores de tensión o voltaje tiendan a reducirse y permanecer dentro de los márgenes de tolerancia establecidos en las normas técnicas.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

A continuación, podemos observar un ejemplo de cómo se realizará la tabulación de los datos para cada caso de análisis:

Tabla IV. **Ejemplo de tabulación de datos**

Datos de salida				
Caso base				
Datos de entrada	Voltaje Barra 1 [V]	Voltaje Barra 2 [V]	Voltaje Barra 3 [V]	Perdidas [kW]
Potencia activa				
Potencia reactiva [0 - 30]				

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 365.

Las casillas de color verde serán los valores que se estarán variando tanto para la potencia activa de generación y carga, así como para la potencia reactiva que para el presente estudio podrá variar de 0.1 MVAR a 30 MVAR esto definido en la resolución CNEE-194-20198 donde se establece la mayor capacidad del reactor, las casillas celestes serán los valores resultantes posterior a las simulaciones correspondientes, donde:

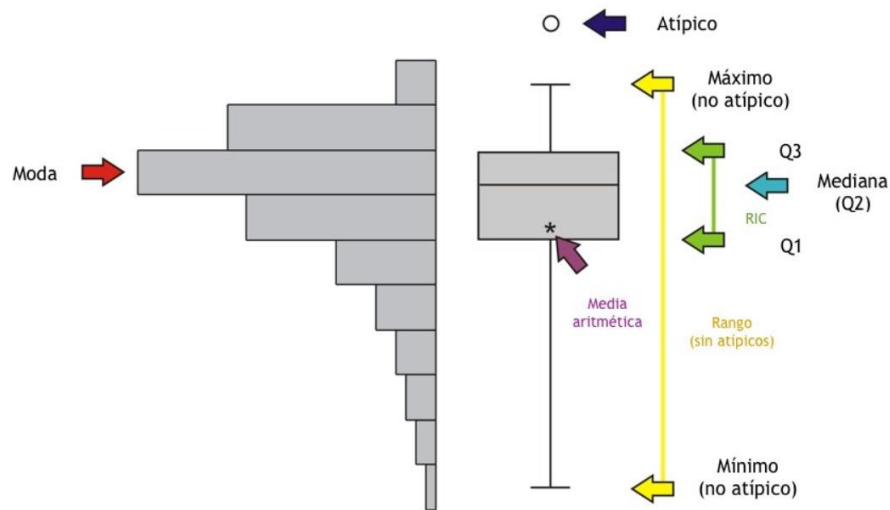
- Voltaje barra 1: voltaje correspondiente a la barra de la subestación Huehuetenango II.
- Voltaje barra 2: voltaje correspondiente a la barra de la subestación Covadonga.

- Voltaje barra 3: voltaje correspondiente a la barra de la subestación Chiantla.
- Perdidas: son las perdidas en el sistema según se varíe la compensación reactiva.

La zona de influencia del proyecto es una zona con bastante inestabilidad en cuanto al voltaje se refiere, es por esto por lo que el análisis del voltaje vs potencia reactiva realizado en el software de simulación nos permitirá el poder determinar la factibilidad de la operación de uno, de otro o de ambos reactores multietapa, de igual manera se estará abordando la investigación mediante la aplicación del método de análisis numérico Newton Raphson.

Se hará la comparación de los valores resultado de las simulaciones de los casos formulados en el numeral 9.4.2 contra el valor de voltaje de mayor significancia estadística, ósea el valor de voltaje con mayor frecuencia de aparición según los registros de mediciones de voltaje de las subestaciones Covadonga y Huehuetenango II, lo anterior se hará mediante el análisis estadístico de diagrama de caja y bigotes, se espera que los valores resultantes se encuentren dentro del Rango intercuartílico (RIC), caso contrario se consideraran como datos atípicos.

Figura 23. Componentes de diagrama de caja y bigotes



Fuente: OnkelDagobert. (2009). *Diagrama de caja de estadísticas balken*.

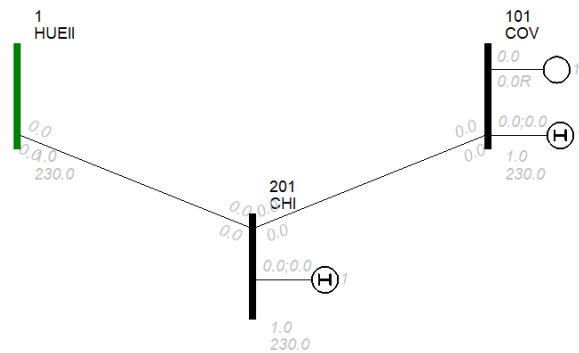
La variación del voltaje dentro de los rangos permitidos por parte del ente regulador nos estará indicando la factibilidad de puesta en marcha u operación de ninguno, uno o los dos reactores multietapa, los valores permitidos de variación de voltaje en transmisión para Guatemala se describen en el numeral 7.2.4 Niveles de tensión del presente documento, los cuales son establecidos por el ente regulador del mercado eléctrico, la CNEE.

Es de suma importancia mencionar que la herramienta informática PSSE es en la actualidad el software de mayor confiabilidad para la realización de estudios eléctricos que se resuelven según los modelos matemáticos Newton – Raphson y Gauss Seidel, actualmente es el líder en cuanto análisis de flujos de potencia se refiere, utilizado en más de 140 países alrededor del mundo.

Esta herramienta mediante simulaciones de flujos de potencia, según la información actual del sistema y los datos que se varíen en los ejercicios a

realizar, reflejará los niveles de tensión en los nodos de estudio del presente diseño de investigación, información con la cual se estará realizando la comparativa de los niveles de tensión permitidos según la normativa vigente en Guatemala y pudiendo determinar la operación y compensación necesaria que sean factibles para esta implementación al SNI.

Figura 24. **Ejemplo de barras a analizar**



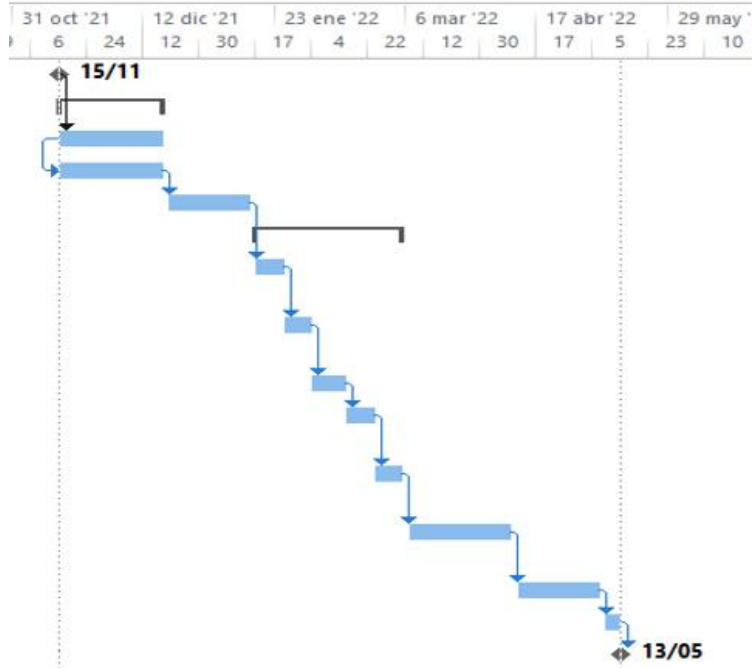
Fuente: elaboración propia, empleando Proteus 8.7.



# 11. CRONOGRAMA

Figura 25. Cronograma de actividades

<b>INFORME FINAL DE GRADUACIÓN</b>	<b>130 días</b>	<b>lun 15/11/21</b>	<b>vie 13/05/22</b>
Inicio	0 días	lun 15/11/21	lun 15/11/21
<b>Recopilación de información</b>	<b>25 días</b>	<b>lun 15/11/21</b>	<b>vie 17/12/21</b>
Información bibliografica	25 días	lun 15/11/21	vie 17/12/21
Bases de datos actuales del sistema	25 días	lun 15/11/21	vie 17/12/21
Armado de casos	20 días	lun 20/12/21	vie 14/01/22
<b>Simulaciones</b>	<b>35 días</b>	<b>lun 17/01/22</b>	<b>vie 4/03/22</b>
Simulación caso base	7 días	lun 17/01/22	mar 25/01/22
Simulación caso Proyecto 1	7 días	mié 26/01/22	jue 3/02/22
Simulación caso Proyecto 2	7 días	vie 4/02/22	lun 14/02/22
Simulación caso Proyecto 3	7 días	mar 15/02/22	mié 23/02/22
Simulación caso Proyecto 4	7 días	jue 24/02/22	vie 4/03/22
Análisis de resultados	25 días	lun 7/03/22	vie 8/04/22
Conclusiones y recomendaciones	20 días	lun 11/04/22	vie 6/05/22
Impresión	5 días	lun 9/05/22	vie 13/05/22
Entrega informe final	0 días	vie 13/05/22	vie 13/05/22



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project 2019.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente estudio se estará realizando en su mayoría con recursos propios, el único recurso que no es de pertenencia del investigador es el equipo de cómputo y el software de simulaciones PSS-E, el cual será proporcionado por la empresa donde se desarrolla laboralmente el investigador en condición de préstamo algo que es de suma importancia ya que no representara gastos mayores.

Si bien el software podrá ser utilizado para la presente investigación, es de suma importancia aclarar que para la utilización del mismo se realizará la movilización física del investigador hacia las oficinas de la empresa por lo que se incurrirá en gastos de transporte y alimentación, así como los gastos de impresión y asesoría, los cuales se describen a continuación:

Tabla V. **Costos de la investigación**

<b>Recurso</b>	<b>Costo</b>	<b>Fuente</b>
Software de simulación	Q 54,277.50 / por año	Empresa de trabajo
Dos resmas de hojas	Q. 150.00	Propia
Viáticos (combustible, alimentación y parqueo)	Q 2,500.00	Propia
Impresiones	Q 300.00	Propia
Asesor	Q 3,000.00	Propia
<b>TOTAL</b>	<b>Q 60,227.50</b>	Propia

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 365.

Tomando en cuenta que la mayor parte de los recursos son de fuente propia, se puede observar que no será de impedimento la realización del trabajo de investigación de manera uniforme y secuencial según las fases del mismo y el cronograma establecido, si cabe resaltar que el acceso al software de simulaciones es en días hábiles en oficinas sin restricción de horas de utilización.

Es por eso por lo que al observar el costo-beneficio de la inversión y utilización de recursos se ve factible la realización del estudio que aporte de manera teórica y cuasiexperimental la factibilidad de la implementación de tecnología nueva a la red del país.

### 13. REFERENCIAS

1. Bengtsson, C., Ryen, K., Rui, O., y Olsson, T. (septiembre, 2014). Variable shunt reactors: applications and system aspects. *Transformers and System technical performance CIGRE SC A2/C4 COLLOQUIUM*. Recuperado de [https://library.e.abb.com/public/0583f43ed8dc4d8c83dc28fb13f7bfca/Variable%20Shunt%20Reactors\\_Cigre2014\\_A2\\_211\\_2014.pdf](https://library.e.abb.com/public/0583f43ed8dc4d8c83dc28fb13f7bfca/Variable%20Shunt%20Reactors_Cigre2014_A2_211_2014.pdf).
2. Checa, L. (1988). *Líneas de Transporte de Energía*. Zaragoza: Boixareu Editores.
3. CNEE. (1999). *Normas Técnicas del Servicio de Distribución -NTSD-*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/03%20NTSD.pdf>.
4. CNEE. (2009). *Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones*. Guatemala: Autor. Recuperado de: <https://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/09%20NTT.pdf>.
5. Coto, J., Pérez, K., y Vásquez, E. (2015). *Solución a problemas prácticos en estado estable del Sistema Eléctrico de Transmisión de El Salvador utilizando el software PSS/E-Xplorer versión 33*. (Tesis de licenciatura). Universidad de EL Salvador, El Salvador. Recuperado de:

<http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/8658/1/Soluci%C3%B3n%20a%20problemas%20pr%C3%A1cticos%20en%20estado%20estable%20del%20sistema%20el%C3%A9ctrico%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20El%20Salvador%20utilizando%20el%20software%20PSS%E%20Xplorer%20versi%C3%B3n%2033.pdf>.

6. Grainer, J., y Stevenson, W. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. México: McGraw-Hill.
7. Guerra, P. (2018). *Estudio del comportamiento de la potencia reactiva en sistemas zonales y propuesta de criterios para la compensación en subestaciones at/mt* (Tesis de licenciatura). Universidad de Chile, Chile. Recuperado de: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/01/Anexo-4-Estudio-de-compensaci%C3%B3n-de-reactivos.pdf>.
8. Hayt, W., y Buck, J. (2006). *Teoría electromagnética*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
9. Khorami, M. (2011). *Application Fields and Control Principles of Variable Shunt Reactors with Tap-Changer*. (Tesis de maestría). Chalmers University Of Technology, Suecia. Recuperado de: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174457/174457.pdf>.
10. Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGraw- Hill.

11. López, G. (2015). *Estudio técnico preliminar para la implementación de compensación de reactivos en línea de transmisión Panaluya–San Buenaventura*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3232/1/Gustavo%20Adolfo%20L%C3%B3pez%20Mu%C3%B1oz.pdf>.
12. Martínez, B. (2007). *Modelo matemático aplicado al efecto Ferranti en subestación Tactic*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0653\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0653_EA.pdf).
13. Resolución 194-2019. Modificaciones Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental del Proyecto PET-01-2009, Plan de Expansión de Transporte 2008-2018 Lote B, Segunda Alternativa a Subestación Chiantla 230/69 kV y Adecuación de Líneas de Transmisión Asociadas. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Guatemala 03 de septiembre de 2019.
14. Vásquez, P. (2011). *Selección óptima de los nodos del sistema eléctrico de potencia nacional para instalación de compensación reactiva*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0170\\_ME.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0170_ME.pdf).
15. Villegas, M. (2003). *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. Colombia: Mejía Villegas S.A.





## 14. APÉNDICES

### Apéndice 1. Matriz de Coherencia

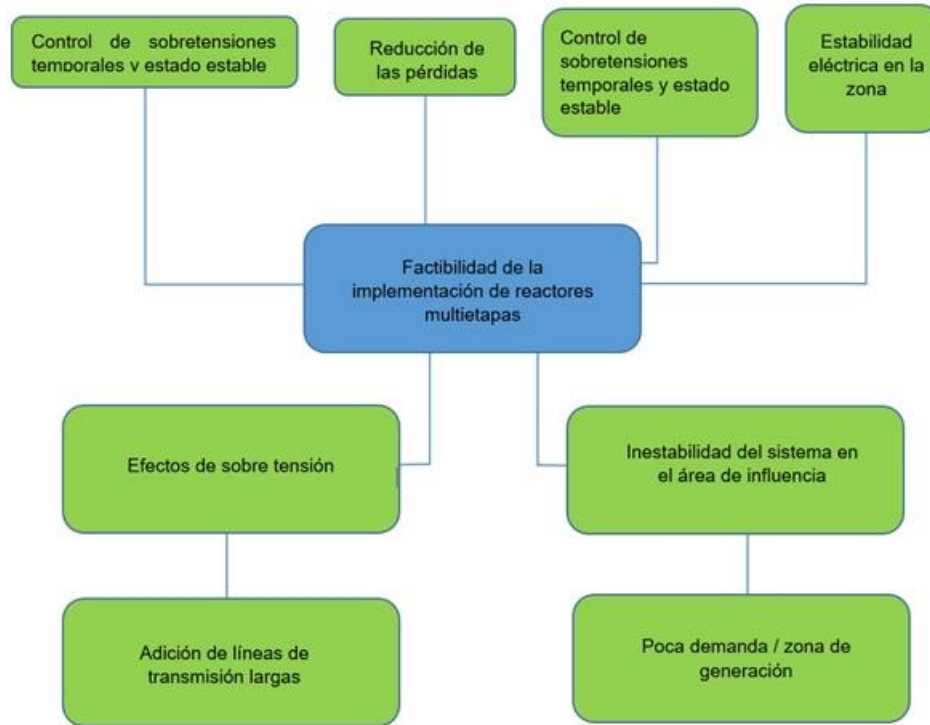
Problema de la investigación	Preguntas de investigación	Objetivos	Metodología
	Principal	General	
<p>Estudio de la factibilidad y los impactos Positivos / Negativos mediante una metodología lógico-Deductiva y realización de simulaciones de lo que conlleva la implementación de los reactores multietapa en las subestaciones Chiantla y Covadonga.</p>	<p>¿Es factible la instalación de unidades de compensación reactiva mediante realización simulaciones?</p>	<p>Establecer si es factible la instalación de compensación reactiva mediante reactores multietapa en las subestaciones Chiantla 230/69 kV y Covadonga 230 kV</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcance Correlacional</li> <li>• Diseño cuasiexperimental</li> <li>• Enfoque cuantitativo</li> <li>• Variables de estudio:               <ul style="list-style-type: none"> <li>o Voltaje [kV]</li> <li>o Potencia activa [MW]</li> <li>o Potencia reactiva [MVar]</li> <li>o Perdidas [kW]</li> </ul> </li> <li>• Fase 1: Recopilación bibliográfica, Planteamiento y armado de casos de análisis mediante simulaciones</li> <li>Recopilación de información del estado actual del SNI (base de datos para simulaciones).</li> <li>Establecimiento de los diferentes casos proyectos a analizar y escenarios posibles.</li> </ul>

Continuación del apéndice 1.

	Auxiliares	Específicos	Fase 2 Realización de Simulaciones
Estudio de la factibilidad y los impactos Positivos / Negativos mediante una metodología lógico-Deductiva y realización de simulaciones de lo que conlleva la implementación de los reactores multietapa en las subestaciones Chiantla y Covadonga	¿Cuáles serán los niveles de tensión en los nodos de las subestaciones Chiantla y Covadonga con la implementación de los reactores multietapa?	Determinar mediante simulaciones los niveles de tensión en los nodos a los que corresponden las subestaciones eléctricas Chiantla 230/69kV y Covadonga 230 kV y su área de influencia eléctrica con la a la implementación de los reactores multietapa.	Fase 2.1 Simulaciones para el análisis de tensión
	¿Cuáles son los niveles de perdidas previo y posterior a la implementación y puesta en operación de los reactores multietapas?	Determinar mediante simulaciones los niveles de pérdidas antes y después de la instalación de los reactores multietapa	Fase 2.2 Simulaciones para el análisis de valores de perdidas
	¿Aportará confiabilidad al sistema en el área de influencia eléctrica la puesta en operación de los reactores multietapa?	Determinar el nivel de Confiabilidad con la instalación de los reactores multietapa al sistema.	Fase 2.3 Simulaciones para el análisis de confiabilidad
	¿Cuál es el impacto de los reactores al Sistema Nacional Interconectado según las características y el tipo de funcionamiento de esta tecnología mediante simulaciones?	Estudiar mediante simulaciones de flujos de carga el impacto de los reactores multietapas con cambiador de tomas bajo carga (OLTC) según las características y funcionamiento de esta tecnología no implementada anteriormente en el Sistema Nacional Interconectado.	Fase 2.4 Simulaciones para el análisis de características y funcionamiento de los RMD

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 365.

## Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint 365.

