



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL DESARROLLO DE  
SMART GRID Y ENERGÍAS RENOVABLES, MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS  
FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA**

**Erick Oswaldo Ixmatul Nájera**

Asesorado por el M.A. Ing. Edgar Yanuario Laj Hun

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL DESARROLLO DE  
SMART GRID Y ENERGÍAS RENOVABLES, MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS  
FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ERICK OSWALDO IXMATUL NÁJERA**

ASESORADO POR EL M.A. ING. EDGAR YANUARIO LAJ HUN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

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. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
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 EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL DESARROLLO DE SMART GRID Y ENERGÍAS RENOVABLES, MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 10 de noviembre de 2020.

**Erick Oswaldo Ixmatul Nájera**

Ref. EEPFI-1379-2020  
Guatemala, 10 de noviembre de 2020

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

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL DESARROLLO DE SMART GRID Y ENERGÍAS RENOVABLES, MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA**, presentado por el estudiante **Erick Oswaldo Ixmatul Nájera** carné número **200914921**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

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

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Edgar Yanuario Laj Hun

Asesor

Edgar Yanuario Laj Hun  
Ingeniero Electricista  
Col.11475

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador de Área  
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético

Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-024-2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL DESARROLLO DE SMART GRID Y ENERGÍAS RENOVABLES, MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA**, presentado por el estudiante universitario Erick Oswaldo Ixmatul Nájera, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Guatemala, noviembre de 2020

DTG. 166.2021.

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 Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL DESARROLLO DE SMART GRID Y ENERGÍAS RENOVABLES, MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA**, presentado por el estudiante universitario: **Erick Oswaldo Ixmatul Nájera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
DECANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, abril de 2021.

AACE/asga

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por estar conmigo en todas las etapas de mi vida, en especial en los momentos más oscuros, donde siempre me ha mostrado el camino a seguir.
- Mi madre** Marta Nájera, por ser mi ejemplo y por estar siempre, sin importar la circunstancia siguiendo el ejemplo de María “No estoy aquí, soy tu madre y te cuido”.
- Mi padre** Pedro Ixmatul (q. d. e. p.), por haberme guiado durante toda su vida terrenal, esperando el siga pendiente de cada paso que doy.
- Mis hermanos** José Miguel y Pedro Antonio Ixmatul por siempre estar cuando los necesitaba, quienes me ayudaron de diversas maneras y en innumerables ocasiones.
- Mi abuela** Francisca García (q. d. e. p.), quien me apoyo en todo momento y circunstancia de la vida siendo siempre un pilar fundamental en mi formación personal.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por haberme permitido ingresar a esta gran e histórica casa de estudios siendo así mi *alma mater*.
- Facultad de Ingeniería** Por haberme acogido como uno de sus estudiantes y toda la formación brindada para obtener así los conocimientos que permiten que pueda concluir el presente trabajo de graduación.
- Escuela de Estudios de Postgrado** Por la oportunidad de culminar la carrera de postgrado y por permitirme seguir con el crecimiento personal e intelectual que brinda a nivel de postgrado.
- Mis amigos de la facultad** Oscar Jirón, Wilder González, Sergio López, Silvio Urizar, Jorge Top y un gran número más de amigos y compañeros que ayudaron a sobrellevar las dificultades que conlleva estudiar en tan prestigiosa facultad.
- Mi asesor** M.A. Ing. Edgar Yanuario Laj Hun por su apoyo sincero y desinteresado.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
3.1. Contexto general .....	5
3.2. Descripción del problema .....	5
3.3. Formulación del problema .....	8
3.3.1. Pregunta central .....	8
3.3.2. Preguntas auxiliares .....	8
3.4. Delimitación del problema .....	9
4. JUSTIFICACIÓN .....	11
5. OBJETIVOS .....	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Electrónica de potencia .....	17
7.1.1. Definición.....	17
7.2. Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna .....	19

7.2.1.	FACTS-definición general .....	22
7.2.2.	Inicio de los FACTS.....	23
7.2.3.	Tipos de controladores FACTS .....	25
7.2.4.	Modelado de FACTS.....	25
7.3	Energías renovables y GDR.....	27
7.3.1.	Fuentes de energía renovable.....	30
7.4.	Redes inteligentes (smart grid) .....	34
7.5.	Estructura del mercado eléctrico de Guatemala .....	38
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	41
9.	METODOLOGÍA .....	47
9.1.	Características del estudio .....	47
9.1.1.	Enfoque.....	47
9.1.2.	Alcance.....	48
9.1.3.	Diseño .....	48
9.2.	Unidades de análisis .....	49
9.3.	Variables .....	50
9.3.1.	Pregunta principal .....	50
9.3.2.	Preguntas auxiliares.....	51
9.4	Fases de estudio.....	55
9.4.1	Fase 1: revisión de bibliografía.....	55
9.4.2	Fase 2: creación de base de datos .....	55
9.4.3	Fase 3: modelamiento y simulación .....	56
9.4.4	Fase 4: análisis de datos.....	56
9.4.5	Fase 5: análisis de integración de FACTS .....	57
9.4.6	Fase 6: interpretación de resultados .....	57
9.5	Resultados esperados.....	58

10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	59
11.	CRONOGRAMA.....	63
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	65
13.	REFERENCIAS.....	67
14.	APÉNDICES.....	71
15.	ANEXOS .....	75



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Árbol de problema.....	7
2.	Esquema de solución.....	16
3.	Esquema básico de electrónica de potencia.....	19
4.	Transformador de cambio de fase .....	24
5.	Proyección de emisiones 2002-2030 .....	30
6.	Matriz de energía de Guatemala (2019) .....	32
7.	Estructura de smart grid.....	37
8.	Estructura del mercado eléctrico guatemalteco .....	38
9.	Estructura de mercado minorista .....	39
10.	Cronograma .....	64

### TABLAS

I.	Cantidad de energía generada por tipo de tecnología .....	33
II.	Variable pregunta principal .....	51
III.	Variables pregunta auxiliar 1.....	51
IV.	Variables pregunta auxiliar 2 .....	52
V.	Variables pregunta auxiliar 3 .....	52
VI.	Variables pregunta auxiliar 4 .....	53
VII.	Definición teórica y operativa de las variables.....	54
VIII.	Actividades según cronograma .....	63
IX.	Recursos necesarios .....	65



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>B/C</b>	Beneficio-Costo
<b>btu</b>	British thermal unit
<b>i</b>	Corriente
<b>d</b>	Distancia
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>US\$</b>	Dólar, moneda de Estados Unidos
<b>°C</b>	Grados de Temperatura
<b>GWh</b>	Gigavatio-hora
<b>MVA</b>	Mega voltamperio
<b>MW</b>	Megavatio
<b>MWh</b>	Megavatio-hora
<b>%</b>	Porcentaje
<b>P</b>	Potencia activa
<b>S</b>	Potencia aparente
<b>Q</b>	Potencia reactiva
<b>Q</b>	Quetzales, moneda de Guatemala
<b>ΔV</b>	Variación de voltaje
<b>v</b>	Voltio
<b>VAR</b>	Voltamperio reactivo



## **GLOSARIO**

<b>ABB</b>	Empresa que se dedica a desarrollar y producir productos que se utilizan en sistemas eléctricos de potencia.
<b>AC</b>	Corriente alterna.
<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista. Encargado de operar el sistema y el mercado eléctrico del país.
<b>Armónicos</b>	Son corrientes superpuestas de frecuencias que son múltiplos de la fundamental.
<b>Biomasa</b>	Producida en la naturaleza sin que intervenga el humano.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Órgano técnico que se encarga de cumplir y hacer cumplir la ley general de electricidad.
<b>DC</b>	Corriente directa.
<b>D-FACTS</b>	Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna aplicados en el sistema de distribución.
<b>EPRI</b>	Instituto de Investigación de Energía Eléctrica [Electric Power Research Institute].

<b>FACTS</b>	Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna.
<b>GDR</b>	Generador distribuido renovable.
<b>HVDC</b>	Alto voltaje en corriente directa [High voltage direct current].
<b>IEC</b>	Comisión Electrotécnica Internacional.
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
<b>Matlab</b>	Software diseñado para realizar cálculos numéricos y simulaciones basadas en los mismos.
<b>Matpower</b>	Paquete gratis de código abierto que funciona en Matlab y Octave.
<b>MEM</b>	Ministerio de Energía y Minas. Órgano del estado responsable de coordinar y formular, políticas, planes, programas relativos al subsector eléctrico y aplicar la ley general de electricidad.
<b>Octave</b>	Software de código abierto de lenguaje de alto nivel diseñado para cálculos numéricos.
<b>OpenModelica</b>	Software gratis y de código abierto basado en el lenguaje de modelado Modelica para modelar, simular, optimizar y analizar sistemas dinámicos complejos.

<b>PEG</b>	Plan de expansión del sistema generación.
<b>PET</b>	Plan de expansión del sistema de transporte.
<b>Simulación</b>	Método de investigación en el que se diseñan modelos de un sistema real y llevar a término experiencias con él para comprender el funcionamiento de un sistema.
<b>Simulink</b>	Entorno de programación visual que funciona como complemento de Matlab.
<b>Smart Grid</b>	Redes inteligentes.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado.
<b>STATCOM</b>	Compensador síncrono estático
<b>SVC</b>	Compensador estático de potencia reactiva
<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno.
<b>Tiristor</b>	Componente basado en electrónica de potencia.
<b>UPFC</b>	Controlador de flujo de potencia unificado



## RESUMEN

La tecnología que se utiliza en generación de energía eléctrica ha evolucionado con el pasar de los años, logrando así reducir sus costos lo que ha provocado un aumento general de su uso, que puede observarse en la matriz energética de los países, tal es el caso de Guatemala en donde hoy se puede observar cómo diariamente el uso de fuentes renovables para generación se ha convertido en su base.

El sistema de transmisión de energía eléctrica al igual que el de generación son fundamentales en un sistema eléctrico de potencia y es por tal motivo que la tecnología evoluciona con el fin de mejorar la confiabilidad del sistema, así como la calidad del servicio.

Los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS) es una tecnología que busca la optimización de los flujos de potencia en las líneas de transmisión existentes, usando para ello la electrónica de potencia.

Las redes inteligentes (Smart Grid) son una tecnología relativamente nueva que busca al igual que los FACTS una mejora del sistema y que permite una integración de los sistemas digitales con los sistemas de potencia haciendo así un sistema de potencia más seguro y confiable.

Smart Grid, FACTS y energías renovables son tecnologías que inevitablemente se volverán la base de todo sistema de potencia y es por tal motivo que el diseño de investigación que se presenta busca determinar cuál es el impacto que provoca la implementación de esta.



# 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe una mejora continua de la técnica de transmisión y distribución de energía eléctrica, la electrónica de potencia se utiliza de base para el desarrollo de nuevas tecnologías. En Guatemala se elaboran Planes de Expansión de Transporte (PET) y Generación (PEG) los cuales buscan garantizar la demanda actual de energía en el país.

Los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS), representa una tecnología reciente, aunque con poca aceptación, pudiendo ser una opción a futuro, lo cual requiere de un análisis de viabilidad posterior. Estos sistemas se utilizan para controlar flujos de potencia y para integrarse en las redes inteligentes (Smart Grid), debido a los usos que se les puede dar, que van desde estabilidad y calidad de la energía en las redes existentes hasta su uso en pro de mejorar la eficiencia energética, lo que ha dado paso a su utilización en los sistemas de distribución.

Las redes inteligentes (smart grid) es el término utilizado para referirse a la modernización del sistema de distribución, que tienen como finalidad mejorar el servicio prestado, reducir costos y mejorar la confiabilidad del sistema. Los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna aplicados al sistema de distribución (D-FACTS) también empiezan a jugar un papel importante en smart grid, se implementan con el fin de obtener un control eficaz de los flujos de potencia.

Las tecnologías mencionadas se tornan importantes, sobre todo por la ampliación de capacidad de generación con recursos renovables, ya que este tipo de tecnologías presentan variabilidad en diferentes parámetros y es donde los FACTS actúan, ya que permiten una respuesta rápida ante cambios abruptos.

Dentro del contexto de nuevas tecnologías; Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS) y energías renovables van de la mano y desembocan inexorablemente en lo que son las redes inteligentes, que finalmente buscan el máximo aprovechamiento de la energía.

Es importante que la población en general y especialmente el estudiante de ingeniería conozca la innovación tecnológica actual y el impacto que produce ya que regularmente el desconocimiento de la tecnología ocasiona problemas sociales y ambientales que a la vez repercuten en problemas técnicos y económicos.

Con anterioridad se han realizado trabajos sobre estos temas, sin embargo, en este diseño de investigación se busca englobar estas tres tecnologías alrededor de los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS), ya que estos pueden funcionar tanto en las energías renovables como en las redes inteligentes, que finalmente es el fin de la mayoría de nuevas tecnologías.

Finalmente, el diseño de investigación busca y pretende introducir al estudiante universitario o profesional con poco o vasto conocimiento de la electricidad en lo que son las nuevas tecnologías para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, tecnologías que, al implementarse a futuro, al utilizarse brindaran a la red mayor eficiencia y beneficios adicionales.

## 2. ANTECEDENTES

Desde los inicios de la energía eléctrica, el transporte ha sido tema de discusión ya que se debe realizar a través de grandes distancias mediante líneas de alto voltaje y desde centrales de generación que se encuentran en lugares alejados de la urbe, que es donde se consumirá. Se han utilizado líneas de corriente alterna (AC) y más recientemente líneas de alto voltaje en corriente directa (HVDC) que cuentan con menos pérdidas, todo con el fin de poder llegar al usuario final quien aprovecha la energía generada.

Para poder realizar la transmisión se suelen construir grandes torres en lugares que regularmente provocan problemas entre la sociedad, asimismo suelen causar daños al medio ambiente, lo que ha motivado la innovación tecnológica en cuanto a transmisión de energía eléctrica se refiere y llegar así al desarrollo de controladores, que basan su funcionamiento principalmente en la de electrónica de potencia, para obtener un mejor control de flujos de potencia y aprovechar así de mejor manera las líneas preexistentes del sistema de transmisión, dicha tecnología son los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS).

“Se espera que una gran cantidad de dispositivos FACTS distribuidos se usarán en Smart Grid especialmente en redes de distribución para varios propósitos de control” (Yu, 2014, p.392).

Los dispositivos FACTS anteriormente eran utilizados en sistemas de transporte, pero recientemente debido a las funciones que pueden realizar se busca que estos se puedan utilizar en sistemas de distribución y de esta manera obtener un control óptimo de flujos de potencia, lo que es de gran utilidad en el desarrollo de las redes inteligentes (smart grid).

“Energía renovable a menudo debe transmitirse a través de largas distancias, mientras se garantiza la fiabilidad adecuada y cumplimiento del código de red, resultando en la necesidad de transmisión a granel y tecnologías innovadoras” (Feldes, Gemmell, y Retzmann, 2011, p.1).

Las centrales generadoras de energía eléctrica forman parte importante del sistema eléctrico de potencia, desde el inicio se ha buscado que la generación sea eficiente y confiable y por tal motivo surgió el tema de mix o matriz energética. Desde hace algunos años se ha empezado a desarrollar lo que son los generadores distribuidos renovables, así como los auto productores, este tipo de generación convierte el sistema eléctrico en algo complejo de manejar y al mismo tiempo suele introducir cambios en el modelo de mercado eléctrico.

Debido a lo anterior, es importante realizar análisis sobre como impacta el agregar nuevas tecnologías a las distintas fases que abarca la producción de energía eléctrica y esto abarca desde lo social a lo técnico, ya que en países como Guatemala es importante conocer si el implementar una nueva tecnología en ciertas áreas provocaría problemas.

Estudiar el impacto de nuevas tecnologías empleadas en los sistemas de transporte se vuelve importante, así como lo es el generar conocimiento científico que sirva de fundamento para poder tener un contexto de la situación actual, ya que hoy en día la electrónica de potencia es aplicada para poder resolver los problemas que se suscitan en varios países en cuanto a transmisión de energía eléctrica se refiere.

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

A continuación, se realiza una descripción sobre el problema que se busca resolver mediante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

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

A nivel global las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica crecen cada vez más, situación que provoca que estas sean de gran tamaño y a la vez más complejas de analizar; situaciones que suscitan en ampliaciones del sistema de transporte, problema que podría ser resuelto con la implementación de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna para mejorar y optimizar el rendimiento de las líneas existentes, permitir la integración de las redes inteligentes (smart grid) y mejorar la calidad de potencia de la red para un mejor funcionamiento e integración de centrales de energía renovable.

Los FACTS son utilizados pero debido a la falta de difusión de la misma estos aún no se utilizan con regularidad, aunado a la falta de estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales provocando que se continúe con el uso de tecnología convencional.

#### **3.2. Descripción del problema**

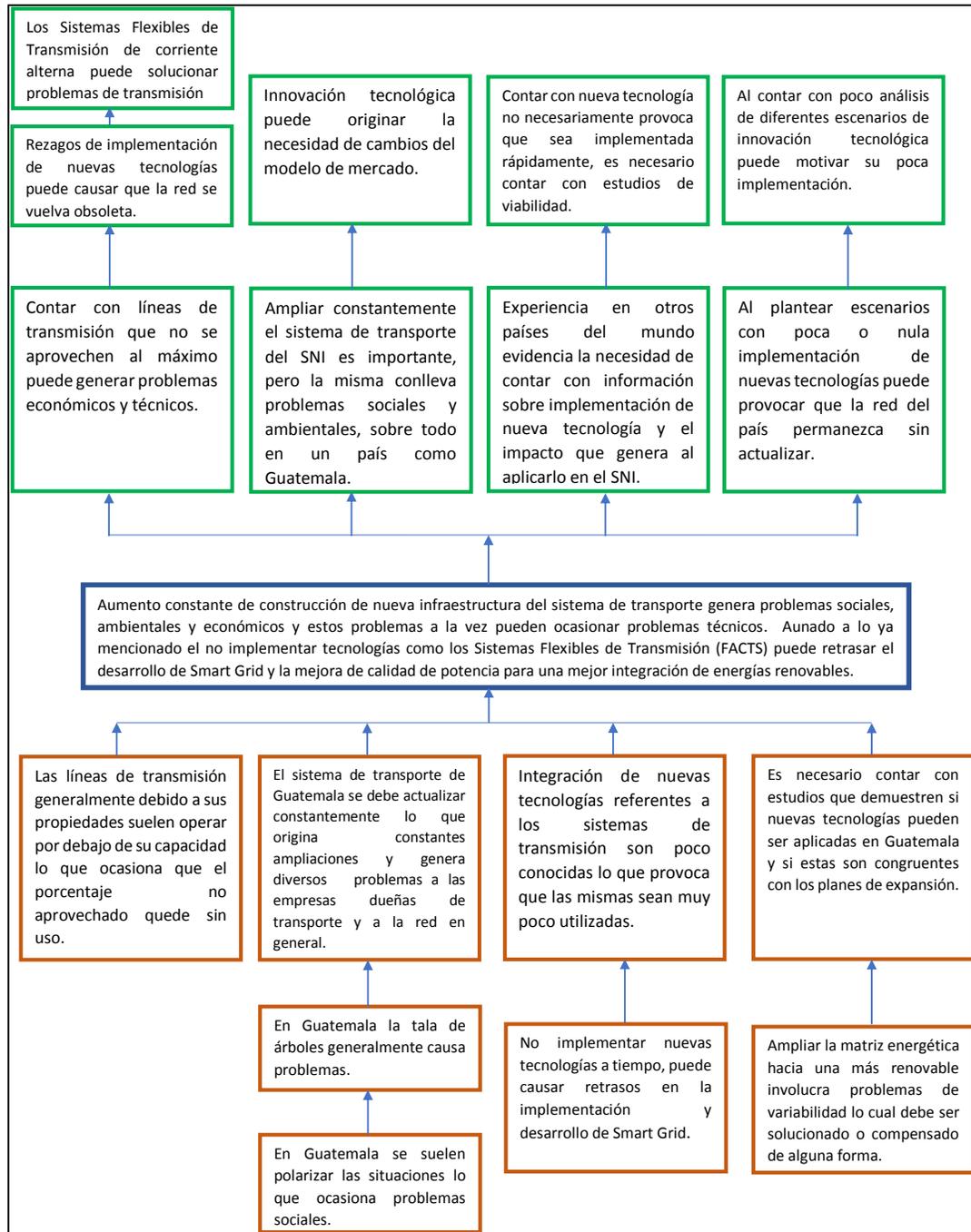
El aumento constante de construcción de nueva infraestructura del sistema de transporte genera problemas sociales, ambientales y económicos y estos a la vez pueden causar problemas técnicos. No implementar tecnologías como los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS) puede retrasar el desarrollo de smart grid, así como una posible mejora de calidad de potencia, para garantizar la integración de energías renovables. Aun cuando es una

tecnología no tan reciente, debido a la versatilidad y facilidad de aplicación de la tecnología convencional, complicando su implementación, por lo que con el desarrollo de este documento se busca romper con este tipo de conceptos que se tiene acerca de la misma.

La innovación tecnológica busca la sostenibilidad energética. En Guatemala las tecnologías mencionadas se desconocen debido a su poca difusión, todo como resultado de un buen funcionamiento de la red a través de los años lo que provoca que cualquier innovación que involucre conceptos referentes a electrónica de potencia o medios digitales, sea difícil de integrar.

Las nuevas tecnologías tienen retos por enfrentar, pero las ventajas que proporciona son mayores a sus desventajas, motivo por el que es importante generar información del impacto que puede causar en Guatemala.

Figura 1. Árbol de problema



Fuente: elaboración propia.

### **3.3. Formulación del problema**

Para la formulación del problema se deben desarrollar preguntas de investigación, las cuales nos darán la pauta para el desarrollo de objetivos, declaración de variables y la posible solución al problema que se plantea.

#### **3.3.1. Pregunta central**

- ¿Cuál es la viabilidad de implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna para lograr un óptimo rendimiento de líneas existentes y determinar así el posible desarrollo de las redes inteligentes y mejorar la integración de energías renovables en el país?

#### **3.3.2. Preguntas auxiliares**

- ¿Cuál es la probabilidad de reducir la construcción de nueva infraestructura en el sistema de transmisión al implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS)?
- ¿Qué posibilidad de integración tienen los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna para así desarrollar redes inteligentes y al mismo tiempo mejorar la incorporación de energías renovables mediante la mejora de calidad de potencia que proporcionan los FACTS?
- ¿Qué impacto produce implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna en sistemas de transmisión y distribución y cómo influirá el mismo en el desarrollo de redes inteligentes y energías renovables?

- ¿Cuál es la posibilidad de realizar análisis comparativo basado en la experiencia de otros países, para determinar su futura implementación en Guatemala y utilizar para ello herramientas estadísticas?

### **3.4 Delimitación del problema**

En general el trabajo gira en torno a cuatro ejes principales que son determinar impacto: técnico, ambiental, económico y social; son cuatro pilares que pretenden sostener el resultado final de este trabajo.

Como primer punto, respecto a la parte técnica, se trabajará con herramientas que conllevan una complejidad mínima (Algoritmos basados en métodos numéricos que pueden funcionar en software opensource o de paga como es el caso de Octave o Matlab respectivamente), esto en relación con el tiempo que se cuenta. Se realizarán, simulaciones únicamente con los FACTS más utilizados y conocidos ya que se infiere que sería la tecnología que se preferiría utilizar debido a su amplio uso y confiabilidad que podría brindar (UPFC, STATCOM, SVC, entre otros), esto se hace debido al tiempo con el que se cuenta para poder desarrollar el trabajo.

En cuanto al impacto económico y ambiental se utilizarán los planes de expansión de generación y transmisión de energía eléctrica de Guatemala (PET y PEG) ya que básicamente muestran donde se planean las nuevas instalaciones de infraestructura de transmisión y generación para así determinar qué cantidad de esta ampliación podría evitarse mediante la implementación de Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna. Las herramientas que se utilizarán serán de uso sencillo y de eficiente manejo de datos, pero con la confianza de que son métodos y herramientas confiables, esto con el fin de garantizar un

análisis real, basándonos también en el tiempo que se tiene, el cual consta de aproximadamente ocho meses para la finalización.

Para el último pilar, el aspecto social, se realizará una encuesta, esto con el fin de determinar si el implementar nuevas tecnologías crearía algún tipo de problema, de igual manera se utilizará bibliografía que contiene problemas de este tipo a los cuales se enfrentaron en otras latitudes y así poder realizar una comparación y finalmente poder establecer cuál sería el impacto que causaría implementar nuevas tecnologías relativas a la transmisión y generación de energía eléctrica.

## 4. JUSTIFICACIÓN

Es necesario realizar un análisis de impacto de innovación tecnológica y englobar lo que son las nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica.

Anteriormente se menciona la línea de investigación en la que se basa este trabajo, su importancia se debe a que actualmente en Guatemala se desarrollan planes de expansión de transporte y generación para determinados ciclos de tiempo, los cuales contemplan la creación de nuevas líneas de transmisión y nuevas centrales generadoras, sin embargo, esto involucra inversión en más infraestructura y mayor daño al ambiente, que a su vez conduce a problemas sociales, siempre es difícil introducir cambios debido a que la tecnología tradicional y que es ampliamente conocida es funcional para las necesidades del país, aunque es imperioso e impostergable la aplicación de las nuevas tendencias tecnológicas permitiendo un mayor control de los flujos de potencia, mejorando el funcionamiento de las centrales generadoras de energía renovable.

Las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica son de gran tamaño, lo que provoca que estas a su vez sean más complejas y por lo tanto difíciles de manejar, dada la anterior circunstancia se han buscado soluciones para obtener el mejor rendimiento posible de las líneas ya existentes y una solución, que surgió debido a esta necesidad fueron los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS, por sus siglas en inglés).

El desarrollo de los controladores FACTS es amplio y se han utilizado con éxito en países que buscan mejorar sus redes ya existentes; se busca que este tipo de controladores se utilicen en los sistemas de distribución donde se espera que tenga un impacto positivo ya que se busca una simbiosis entre esta

tecnología y las redes inteligentes debido a la mejora en cuanto a control de flujos que ofrece la misma.

Generar información de su implementación y uso, para desarrollar de mejor manera redes inteligentes (smart grid) y la integración se alcance con las energías renovables, que demuestre el impacto positivo que tendría su implementación en el mercado energético nacional. Con esta información se podrá simular sistemas donde se acoplen estas tecnologías y observar cómo esta incrementa la estabilidad transitoria y el voltaje, así como la flexibilidad en cuanto a control de flujos se refiere.

## 5. OBJETIVOS

### General

Evaluar la viabilidad de implementación de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna en las líneas de transmisión existentes para optimizar la capacidad de transporte, mejorar la integración de energías renovables y determinar el posible desarrollo de redes inteligentes.

### Específicos

- Comprobar si al implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna es posible reducir la construcción de nueva infraestructura mediante su incorporación al sistema de transporte.
- Analizar la posible integración de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna para desarrollar redes inteligentes y mejorar la incorporación de energías renovables mediante una mejora de la calidad de potencia.
- Establecer el impacto producido al implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna en los sistemas de transmisión y distribución de Guatemala.
- Determinar la viabilidad de implementación del sistema en estudio, en Guatemala y su posible integración a la red de transmisión y distribución del SNI.



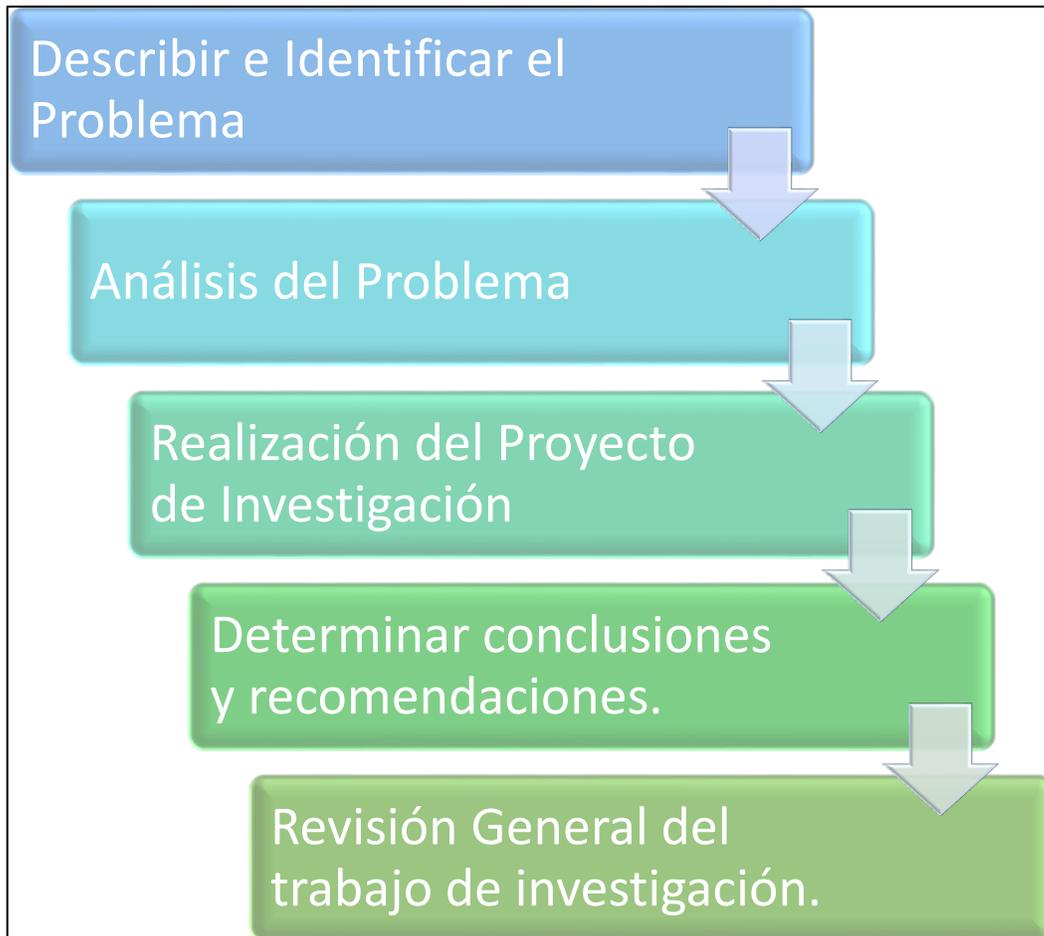
## **6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Uno de los principales motivos de este trabajo consiste en aportar conocimientos y generar interrogantes a futuros estudiantes que deseen conocer más acerca de los temas ya mencionados (FACTS, HVDC, GDR, Smart Grid, Energías Renovables). Asimismo, las fuentes que se utilizarán para el desarrollo de este trabajo serán materiales escritos, materiales audiovisuales, teorías, conversaciones y diversos tipos de materiales referentes a dichos temas.

La fuente de la idea principal para la realización de este trabajo se basa en el hecho de que en la actualidad existe un sinnúmero de información acerca de tecnologías nuevas y que basan su funcionamiento en la electrónica de potencia y al ser un tema que no se le ha tomado la suficiente atención, es poco conocido. Es importante dar herramientas a futuro para que cualquier profesional o estudiante que esté interesado en estos temas tenga un punto de partida para ampliar su acervo académico, científico, investigativo e incluso, proponer o desarrollar proyectos futuros. Se trabajará bajo la premisa de buscar una solución a la implementación de nuevas tecnologías en el sistema de transporte con el fin de buscar sostenibilidad mediante el uso de FACTS, Smart Grid y Energías Renovables como un conjunto y no individualmente para así poder lograr un mejor acoplamiento de las tecnologías.

En consecuencia, se pretende brindar herramientas para que en el futuro inmediato se realicen simulaciones en programas como Simulink, una herramienta de Matlab (Octave, OpenModelica, Matpower y otros programas de acceso libre), esto con el fin de tener un mayor entendimiento sobre el funcionar de los sistemas que se desean analizar. Con base en lo anterior se plantea un esquema de solución como se muestra en la imagen siguiente:

Figura 2. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

## **7. MARCO TEÓRICO**

La innovación tecnológica actualmente es amplia y por tal motivo en el presente capítulo se muestra una recopilación de conceptos fundamentales que se necesitan desarrollar para el presente trabajo de investigación.

### **7.1. Electrónica de potencia**

La electrónica usualmente era utilizada únicamente con corriente de un amperaje bajo y voltajes generalmente pequeños, como se verá a continuación la electrónica ha avanzado y ha logrado aplicaciones que pueden utilizarse en sistemas de potencia.

#### **7.1.1. Definición**

A través de los años, una de las ramas más importantes de la ingeniería como lo es la electrónica ha tenido un gran crecimiento, crecimiento que hoy en día es actualizado casi a diario, y es la electrónica de potencia uno de los avances más importantes que ha habido en esta rama.

La electrónica de potencia en si ha sido desarrollada como resultado de la búsqueda por controlar grandes voltajes y corrientes, en contraparte con la electrónica de baja potencia que se caracteriza por manejar corrientes y voltajes muy pequeños. De acuerdo con lo ya mencionado podríamos definir a la electrónica de potencia como: Rama de la electrónica que se encarga del desarrollo de nuevas tecnologías, que basan su funcionamiento en dispositivos de estado sólido para el control y manejo de altos voltajes, corrientes y en general de energía eléctrica de alta potencia. Lo anterior es una definición muy general y

burda por lo que a continuación se encuentran dos definiciones que describen más fielmente lo que es la electrónica de potencia.

“En términos generales, la tarea de la electrónica de potencia es procesar y controlar el flujo de energía eléctrica mediante el suministro de voltajes y corrientes en una forma óptima para las cargas de los usuarios” (Mohan, Undeland, y Robbins, 2009, p.3).

Se puede considerar que la electrónica de potencia fundamentalmente centra su funcionamiento en controlar la energía eléctrica en base a un control directo de los flujos de potencia.

“La electrónica de potencia se puede definir como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica” (Rashid, 1993, p.1).

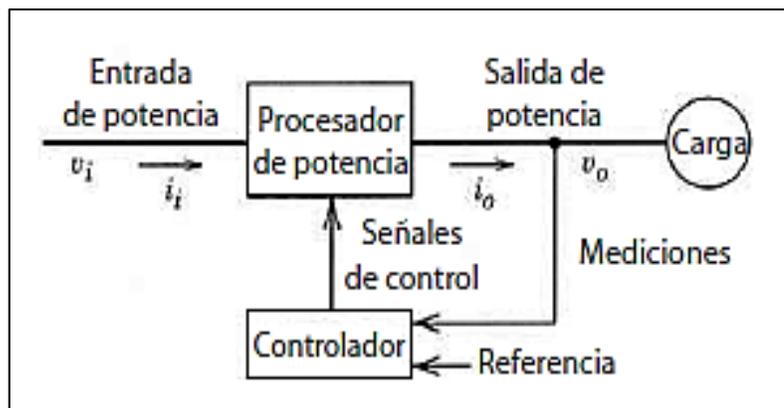
Los autores coinciden en la búsqueda de control y conversión de la energía eléctrica. Durante décadas se consideró que las ramas de ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica no podían convivir debido a las diferencias en cuanto a manejo de potencia se trata, si bien no ha sido una separación total, anteriormente nunca se consideró el control de los flujos de potencia mediante el uso de la electrónica.

Si se toma en cuenta la definición que nos presenta Rashid (1993) en su libro *Electrónica de Potencia* debemos considerar la tecnología empleada actualmente utilizada en la manufactura de los dispositivos semiconductores, la cual ha permitido una mejora considerable en el control de altos voltajes y corrientes, como en el diseño de dispositivos destinados a la protección que

funcionan con mayor rapidez en comparación a los que basan su funcionamiento en dispositivos mecánicos.

Actualmente la electrónica de potencia está posicionada como una de las tecnologías emergentes capaz de controlar flujos de potencia, las aplicaciones que se han podido desarrollar comprenden desde productos que incluyen controles de iluminación hasta controles capaces de modificar los diferentes parámetros de las líneas de transmisión e incluso operar en los sistemas de distribución.

Figura 3. **Esquema básico de electrónica de potencia**



Fuente: Rashid. (1993). *Electrónica de potencia*.

## 7.2. Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna

El crecimiento acelerado de la población trae consigo un inminente aumento de la demanda energética y es por tal motivo que año con año se añaden nuevas líneas de transmisión al sistema eléctrico, esto no solamente ocurre en nuestro país, sino que ocurre a nivel mundial y debido a eso se han desarrollado tecnologías nuevas para aprovechar el máximo potencial de las líneas de

transmisión existentes, como se demuestra en los planes de expansión que están en desarrollo a nivel nacional.

Aunque los planes de expansión de transporte por el momento son una solución, es posible que en el futuro se necesite de los sistemas FACTS, debido a la flexibilidad que estos proporcionan, especialmente por los problemas que se enfrentan en nuestro país cada vez que se requiere introducir torres de transmisión o plantas de generación, y a lo anterior hay que añadirle la dificultad de adquisición de los terrenos para la construcción de estos.

Anteriormente pensar en que la electrónica podía introducirse ya sea en generación, transmisión o distribución de energía eléctrica era algo casi imposible, pero hoy en día con el desarrollo de la electrónica de potencia se ha logrado desarrollar sistemas capaces de controlar los flujos de potencia, así como controlar diferentes variables que interactúan en un sistema de transmisión y lograr tener sistemas flexibles tal como su nombre lo indica.

Estos sistemas surgen también como necesidad de reducir las pérdidas producidas en transmisión, este punto es muy importante ya que al reducir la capacidad de transmisión de un sistema, la etapa de generación se ve afectada, ya que la potencia que es capaz de suministrar la central generadora no se aprovecha al 100 %, si se analiza un escenario utópico: se asumirá una central eléctrica de 250 MW de potencia que busca cubrir cierta demanda, donde no se toman en cuenta las pérdidas por transmisión, dado que en centrales construidas en el siglo anterior no consideraban que en algún momento lo digital se pudiera conjugar con la potencia en alto voltaje, lo que puede ocasionar diversos problemas tales como: no cubrir la potencia demandada, lo que causaría que otras centrales tengan la obligación de cubrir el faltante, esto hará que al momento de un despacho económico la energía eléctrica podría resultar más

cara y en el peor escenario posible se podría necesitar la construcción de una nueva central; es por tanto que en situaciones como la anterior los controladores FACTS serían útiles, ya que la función de estos es desarrollar la máxima eficiencia esperada de una línea de transmisión.

Ya se han mencionado diversas razones de porque el uso de estos sistemas, sin embargo, aún no se ha puesto en contexto el factor económico y la dificultad para manejar los sistemas de potencia demasiado grandes. La implementación de sistema FACTS puede resultar oneroso debido a los estudios que hay que realizar, al equipo que se requiere y personal que se necesitaría; pero, a largo plazo estos sistemas ahorraran dinero, este ahorro se dará en el momento que se requiera entregar una potencia demandada mayor a la actual, esto debido a la instalación de nuevas líneas de transmisión, sin embargo, como virtualmente se poseerán los sistemas FACTS bastará con que la línea pueda operar al máximo de potencia que puede entregar.

A medida que un sistema eléctrico de potencia aumenta su tamaño su operación se vuelve más compleja, dando como resultado un mal manejo del exceso de potencia reactiva que aparece en el sistema, y finalmente esto da como resultado el no aprovechamiento de todo el potencial que un sistema de transmisión puede entregar.

Actualmente se puede controlar el exceso de potencia reactiva, sin embargo, hay que recordar que para poder realizar esta tarea se utiliza equipo que requiere de la mecánica para operar, sin mencionar que se requieren grandes bancos de inductores o capacitores para poder controlarlo y es aquí donde los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna actúan.

### **7.2.1. FACTS-definición general**

Usualmente el termino FACTS se utiliza en cualquier dispositivo que utilice electrónica de potencia y que sea capaz de modificar en tiempo real los parámetros de un sistema de transmisión, sin embargo, en este trabajo utilizaremos un concepto que englobe a todos los dispositivos y para ello utilizaremos el concepto que utiliza IEEE, el cual dice: “Sistema flexible de transmisión de corriente alterna (FACTS): Sistema que mediante la incorporación de controladores estáticos basan su funcionamiento en electrónica de potencia, para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia” (Hingorani y Gyugyi, 2000, p.18).

“La habilidad para adaptarse a los cambios en el sistema de transmisión eléctrica o a las condiciones de operación, manteniendo suficientes márgenes de estado estacionario y transitorios” (Pérez, 2016, p.1).

Generalmente un sistema eléctrico de potencia debe ofrecer características como seguridad, fiabilidad, resiliencia, por mencionar algunas propiedades con las que cuentan los sistemas y los FACTS que son en un contexto global una aplicación funcional de la electrónica de potencia ofrecen mejorar las siguientes características: controlabilidad, estabilidad y capacidad de transferencia de potencia. Todas las características mencionadas ofrecen ampliar los mecanismos de protección, así como una mejor y más fácil transición hacia un sistema que permite la evolución hacia una smart grid (red inteligente).

La tecnología de los controladores FACTS en este momento no se limita únicamente al sistema de transmisión, recientemente se empezó a utilizar la tecnología llamada D-FACTS que básicamente buscan aplicarse en el sistema

de distribución y que surgen como solución para una integración con las redes inteligentes (smart grid) mediante un mejor control de flujos de potencia.

### **7.2.2. Inicio de los FACTS**

Hoy en la mayoría de los sistemas eléctricos de potencia, el control de los flujos es delegado al control en sí de lo que es el generador, y para ello se utilizan transformadores de cambio de fase, igualmente suelen utilizarse compensaciones de potencia reactiva que, con frecuencia, suelen ser capacitores e inductores.

Los transformadores de cambio de fase (phase shifting transformers) son utilizados en redes de transmisión de gran tamaño en donde usualmente se requiere realizar un cambio de fase de manera imprevista, este tipo de transformador inyectan un voltaje con un ángulo de fase determinado para que la red opere sin contratiempos y de forma eficiente.

Los métodos para controlar los flujos de potencia se basan en tecnologías antiguas y aunado a la dificultad de controlar redes de transmisión demasiado grandes, se han desarrollado tecnologías que involucran electrónica, para poder obtener un mejor control y es así como surgen los controladores FACTS.

Con el fin de obtener un mejor manejo de ángulo de fase y para poder controlar voltajes de diferente fase, la tecnología de los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna se empleó primariamente en los transformadores de cambio de fase, pudiendo afirmar que este tipo de controlador corresponde a la primera generación de controladores FACTS, debido a su desarrollo ha experimentado un avance constante y permite el control directo de los flujos de potencia.

Figura 4. **Transformador de cambio de fase**



Fuente: HITACHI ABB (2020). *Phase shifting transformers (PST)*. Consultado el 10 Julio de 2020. Recuperado de <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/transformers/power-transformers/system-intertie-transformers/phase-shifting-transformers>.

Aunque se cuenta con los controladores FACTS es importante saber que tecnologías como lo son las líneas de alta tensión de corriente directa (HVDC) y los compensadores estáticos de VAR (SVC) son muy utilizados ya que estos dispositivos se podrían decir que están en una etapa donde ya es confiable y seguro el uso de estos para mejorar los sistemas de transmisión de una región o país.

Según indicación previa, SVC ya es utilizado, pero también hay que agregar que el uso de STATCOM también juega “un rol importante para el soporte dinámico de voltaje” (Schlabach y Rofalski, 2014, p.178), este tipo de controladores son muy utilizados y permiten que aplicados en los sistemas de distribución obtener una protección para los usuarios finales que consiste en protección contra caídas y sobretensiones de voltaje así como una reducción de armónicos.

### **7.2.3. Tipos de controladores FACTS**

Ya se ha mencionado para que se utilizan los controladores FACTS, sin embargo, es importante conocer los tipos básicos de controladores que podemos encontrar, conformado por cinco categorías siendo:

- Compensador estático-paralelo
- Compensador estático-serie
- Reguladores de Voltaje y Angulo de Fase
- Compensadores Combinados
- De función Especial

Las categorías mencionadas funcionan con base en la función que se desee realizar. Los diferentes tipos surgen también como solución a una integración de energías renovables, las centrales suelen encontrarse alejadas de las urbes a las cuales abastecen, lo que hace que el traslado de la energía sea más costoso y difícil; es aquí donde los FACTS ofrecen una mejora ante las variaciones de frecuencia, calidad de la potencia y otros parámetros que necesitan de una respuesta rápida y precisa y donde los interruptores mecánicos se quedan rezagados.

### **7.2.4. Modelado de FACTS**

La electrónica de potencia ha tomado un papel relevante en los sistemas eléctricos de potencia ya que con frecuencia se puede encontrar aplicaciones basadas en electrónica de potencia que ayudan a mejorar aspectos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

En la actualidad podemos encontrar dos tecnologías que basan su funcionamiento en la electrónica de potencia, estas son: -1- el control de potencia reactiva y activa y -2- mejorar la calidad de la potencia. La primera, los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna cuya función principal es controlar el flujo de potencia activa y reactiva, y utiliza para su fin el uso de diversos dispositivos semiconductores de potencia capaces de realizar conmutaciones en una perfecta sincronización para un funcionamiento correcto.

La segunda busca que el uso de la energía sea más personal, es decir que el usuario cuente con una mayor participación, por lo cual podemos considerar que esta centra su funcionamiento en sistemas de baja tensión; a esta se le ha empezado a llamar “smart grid” o redes inteligentes por su nombre en inglés.

Con frecuencia se asocia la introducción de la electrónica de potencia a estas tecnologías, no obstante, inicio a utilizarse en válvulas y convertidores, en los sistemas que utilizan líneas de alta tensión de corriente directa “HVDC”, con el fin de lograr armonía entre los sistemas de AC y los que utilizan DC. Entre los que se pueden mencionar: Las Tres Gargantas en China que posee ramales de HVDC en su funcionamiento, Itaipú en Brasil, lugar donde también se puede encontrar esta tecnología.

Para poder trabajar con los convertidores y controladores se usa como base el tiristor, un dispositivo semiconductor que como se vio anteriormente juega un papel importante en estas tecnologías nuevas.

Aunado al modelamiento, también trataremos con simulaciones, que se realizan primordialmente por las siguientes razones:

- Planeación de sistemas nuevos
- Análisis de fallas
- Optimización de sistemas de potencia
- Estudios de prefactibilidad
- Diseño y estudio de nuevos sistemas
- Condición de operación de sistemas determinados

Una simulación realizada de manera correcta sirve para determinar el comportamiento que pueda tener un sistema tanto en el presente como en el futuro inmediato y a largo plazo.

Existe un gran número de programas que pueden utilizarse para modelar y simular los sistemas eléctricos de potencia, sin embargo, nos centraremos en estudiar los FACTS y su impacto en una línea de transmisión de un sistema de potencia.

### **7.3 Energías renovables y GDR**

La energía eléctrica siempre ha sido motivo de polémica, desde su auge en la famosa guerra de corrientes en el siglo XIX, protagonizada por Nikola Tesla y Thomas Alba Edison hasta la disputa sobre si la energía eléctrica es contaminante o no (Por lo menos la fuente que provee la energía eléctrica), que corresponde a un problema que surge a mediados del siglo XX y que cobra impulso en el siglo XXI.

Desde sus orígenes la generación de energía eléctrica ha dependido en gran medida de bunker, carbón y otros tipos de combustibles fósiles y que se catalogan como no renovables y esto a su vez afecta los sistemas de transmisión y distribución.

Gracias a los avances en tecnologías de generación mediante fuentes de energía renovable, y a la mejora de estas, en diversos países del mundo la matriz energética empieza a depender mayormente de dichas fuentes y es aquí donde se vuelve necesario el desarrollo de la electrónica de potencia para proporcionar un mejor manejo y control de este tipo de generación, mediante las aplicaciones que se pueden desarrollar e implementar a posterior.

Referente al tema de energías renovables se encuentran las centrales de generación distribuida, que básicamente son centrales que se limitan a 5 MW generados a base de recursos renovables pudiendo conectarse a redes de distribución de 13.8 y 34.5 KV; asimismo se consideran en el segmento de renovables a los auto productores quienes no pueden comercializar su excedente como si lo pueden realizar las centrales de generación distribuida.

La mayor parte de países del mundo de acuerdo con Yu (2014) está comprometida con reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, que es de las principales causas de contaminación y sobre todo del calentamiento global.

Los mayores retos en cuanto a materia energética que se pueden encontrar es la integración de la electrónica de potencia en las energías renovables y redes inteligentes.

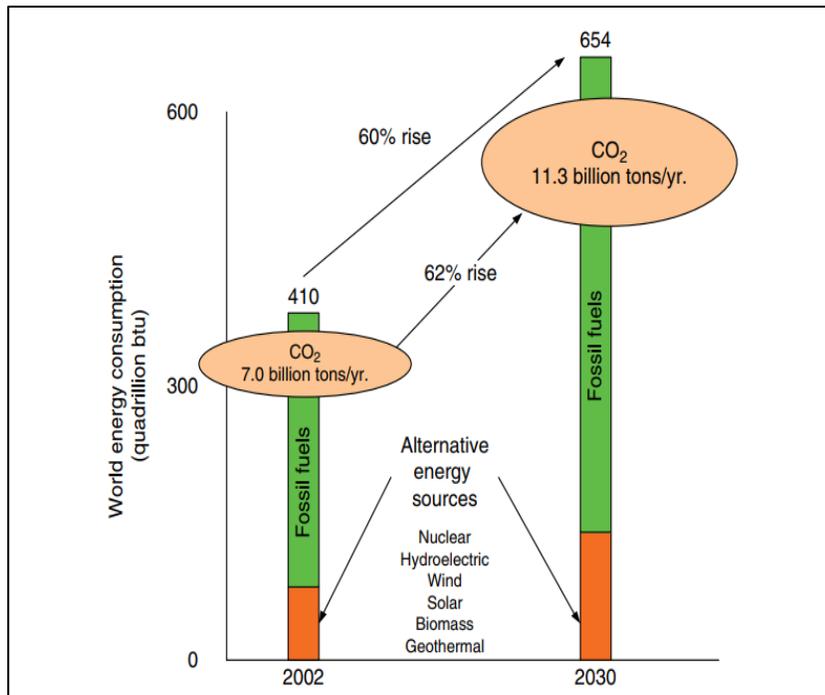
Uno de los mayores impulsores de la innovación tecnológica en cuanto a generación mediante energía renovables se refiere, es el continuo avance del calentamiento global y el cambio climático que cada vez son más evidentes y que año con año causan más daños al ambiente. Los problemas causados por el cambio climático van desde el derretimiento gradual de los glaciares que se encuentran en los polos hasta el incremento de animales en peligros de extinción que aumentan cada año, debido a la pérdida de su hábitat.

La contaminación ambiental produce cambios generales en el ambiente que es lo que causa el calentamiento global y el constante cambio climático. Los distintos países del mundo se han circunscrito a diferentes tratados o protocolos (por ejemplo, el protocolo de Kioto o el acuerdo de París) que buscan reducir los efectos causados por la contaminación y la emisión de todo tipo de gases contaminantes que afectan al planeta.

El protocolo de Kioto busca que países con mayores emisiones de carbono puedan ayudar a la mitigación mediante la implementación de tecnologías que ayuden a reducirla (por ejemplo, los dispositivos de almacenamiento y captura de carbono, al presente con precios elevados) o mediante compra de bonos de carbono; el acuerdo de París busca que el calentamiento global no sobrepase los 2° C y en el mejor de los casos que se logre establecer en 1.5° C.

Lo antes descrito obedece al cumplimiento que deben realizar varios países a diversos protocolos a los que se han adherido y una de las soluciones por las que optan es ampliar sus capacidades de generación de energía mediante la utilización de fuentes renovables y como ya se menciona es aquí donde los controladores FACTS (D-FACTS en distribución), entran en acción para mejorar el control de los flujos de potencia.

Figura 5. **Proyección de emisiones 2002-2030**



Fuente: Bose. (2019). *Power electronics in renewable energy systems and smart grid: technology and applications*.

La imagen anterior muestra una proyección de lo que podrían ser las emisiones de CO<sub>2</sub> entre 2002 y 2030 si no se cuenta con ningún tipo de control.

### 7.3.1. Fuentes de energía renovable

Con la generación por medio de recursos renovables, se requiere conocer las distintas fuentes con las que se cuenta tanto a nivel nacional y mundial, esto con el fin de saber cuál es la capacidad de generación mediante fuentes renovables.

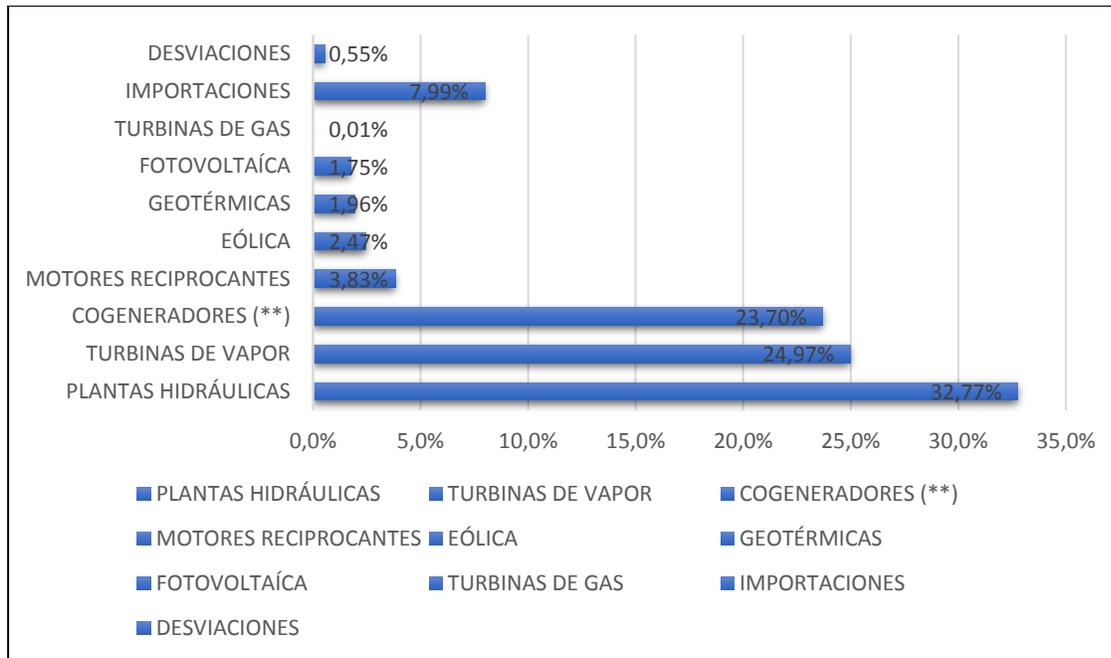
Para efectos de este documento toda energía renovable es aquella que se puede obtener de fuentes que utiliza recursos naturales y en general para este efecto se concentrará en los siguientes tipos de energía renovable: eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar y biomasa.

El uso de fuentes de energía renovable para generar energía trae consigo un gran número de beneficios, últimamente la tecnología que se utiliza en este tipo de generación ha contado con grandes avances lo que ha logrado una reducción en el costo de generación, de acuerdo con Irena (2020) “las centrales solares fotovoltaicas han reducido su costo hasta en un 82 % y de igual manera ocurre con la generación eólica terrestre que ha reducido su costo hasta en un 39 %” (p. 12).

En Guatemala se utiliza el despacho económico para determinar la matriz energética diaria y debido al menor costo de generación mediante renovables estas son despachadas la mayor parte del tiempo (debido a variabilidad que causa que estas no se despachen siempre). El despacho económico básicamente consiste en un análisis económico de las centrales, tomando en cuenta la tecnología, variabilidad y precio buscando así un despacho que cumpla con la demanda y que a la vez sea económicamente aceptable.

En el país de acuerdo con datos publicados por el Administrador del Mercado Mayorista (2019) la matriz de generación de energía durante el año 2019 fue la siguiente:

Figura 6. Matriz de energía de Guatemala (2019)



Fuente: elaboración propia, con base en el *Informe Estadístico 2019*. Consultado el 20 de agosto de 2020. Recuperado de [www.amm.org.gt/portal/](http://www.amm.org.gt/portal/).

La figura anterior muestra como en el país, la generación mediante fuentes de energía renovables forma un buen porcentaje del total generado durante el año 2019, lo que muestra como la matriz de Guatemala es diversa y se cuenta con casi todos los tipos de generación mediante fuentes renovables. Asimismo, demuestra como las centrales que utilizan combustibles fósiles cada vez más son desplazadas dando paso así a la utilización de centrales de energía renovable.

Tabla I. Cantidad de energía generada por tipo de tecnología

Tipo de Central	MWh	GWh	%
<b>PLANTAS HIDRÁULICAS</b>	4,381,130	4,381.13	32.77 %
<b>TURBINAS DE VAPOR</b>	3,338,830	3,338.83	24.97 %
<b>COGENERADORES (**)</b>	3,167,980	3,167.98	23.70 %
<b>MOTORES RECIPROCANTES</b>	512,300	512.30	3.83 %
<b>EÓLICA</b>	330,780	330.78	2.47 %
<b>GEOTÉRMICAS</b>	262,140	262.14	1.96 %
<b>FOTOVOLTAICA</b>	233,410	233.41	1.75 %
<b>TURBINAS DE GAS</b>	1,660	1.66	0.01 %
<b>IMPORTACIONES</b>	1,067,630	1,067.63	7.99 %
<b>DESVIACIONES</b>	72,900	72.90	0.55 %
<b>TOTAL</b>	13,368,760	13,368.76	100.00 %
<b>** Turbinas de vapor.</b>			

Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. (2019). *Informe Estadístico 2019*. Consultado el 20 de agosto de 2020. Recuperado de [www.amm.org.gt/portal/](http://www.amm.org.gt/portal/).

La tabla anterior muestra a detalle lo informado en la figura 4 donde se puede observar que la participación de las centrales de generación que funcionan con fuentes renovables forma un buen porcentaje siendo la fuente hidráulica con un mayor porcentaje debido al recurso hídrico con el que cuenta el país.

#### **7.4. Redes inteligentes (smart grid)**

Antes de empezar a desglosar más ampliamente el tema, debemos preguntarnos ¿Qué es smart grid?

Smart Grid es una evolución de la red actual, esta evolución o cambio involucra un sinnúmero de nuevas características en el manejo de la energía eléctrica, cambios que van desde un simple monitoreo a distancia de la electricidad en los hogares hasta un control más directo de los flujos de potencia.

Al surgir una nueva tecnología hay empresas que se dedican a lucrar con estas y una que ha estado presente en lo que son FACTS y HVDC como lo es ABB nos presenta su definición que dice “Una red inteligente es un sistema avanzado que gestiona la demanda de electricidad de forma sostenible, de manera fiable y económica, construida sobre una infraestructura avanzada y sintonizada para facilitar la integración de todas las partes involucradas” (Meier, 2014, p.6)

Una red inteligente en sí debería ser capaz de efectuar diversas funciones automatizadas entre las cuales tiene que estar, redirigir y controlar directamente los flujos de potencia a donde sean necesarios, lográndolo mediante FACTS, HVDC o mediante alguna otra tecnología capaz de lograr esto.

Las redes inteligentes han surgido debido a la necesidad de suprimir o minimizar debilidades que se detectan en las redes y según un artículo publicado por IEEE una red inteligente: “debe ofrecer monitoreo, administración de energía eléctrica desde generación hasta su destino final con los usuarios y ser capaz de proveer medición inteligente, recarga de vehículos eléctricos, así como la

integración de energías renovables a la red” (Colak, Bayindir y Sagiroglu, 2020, p.122).

Tomando como referencia, un artículo publicado por IEEE una red inteligente tiene como objetivo, según Yu (2014): “mejorar la fiabilidad y eficiencia de una red de potencia, mantener la calidad de la potencia, minimizar los cortes, reducir pérdidas” (p. 2).

Según Yu (2014) “una red inteligente busca en general mejorar el sistema de potencia y una integración con las energías renovables mediante la aplicación de electrónica de potencia” (p. 1).

De acuerdo con un reporte técnico de EPRI (Electric Power Research Institute) hay numerosos beneficios, entre los que se pueden enlistar los siguientes, de acuerdo con Gellings (2011): “mejora de confiabilidad del sistema, mejora la calidad de potencia, mejora en el servicio de electricidad, permite involucrar directamente a los consumidores, permite habilitar nuevos mercados, servicios y productos, optimiza la operación del sistema” (pp. 1-8).

En ese sentido las redes inteligentes (Smart Grid) buscan mejorar los sistemas eléctricos de potencia actuales, a través de un desarrollo sostenible, mejorando la generación de energía mediante recursos renovables y de aplicaciones de electrónica de potencia como lo pueden ser los FACTS, con el fin de obtener mejoras en el rendimiento de las redes con las que ya se cuentan y mejorar la integración con las líneas nuevas de transmisión.

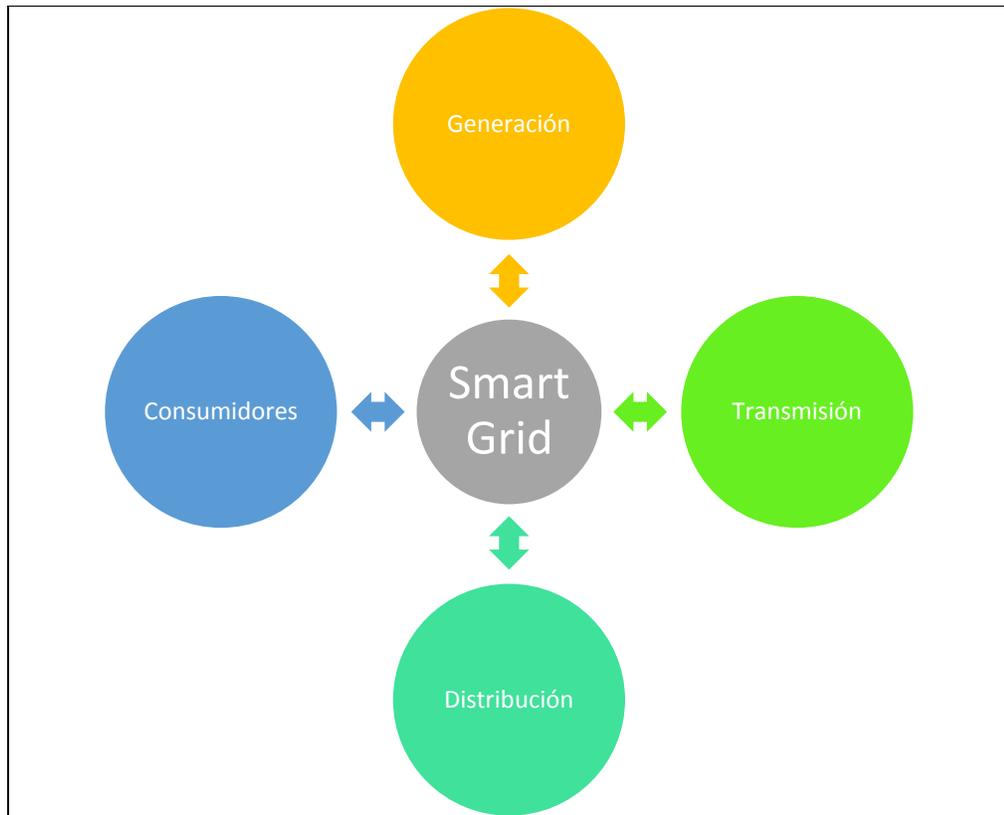
Aún sí el desarrollo de las redes inteligentes mayormente se da en los países más desarrollados, por ejemplo Francia donde se ha iniciado por una implementación de contadores inteligentes (smart metering), es importante que

en Guatemala se empieza a trabajar en formas de integrar las diferentes tecnologías con el propósito de lograr una implementación exitosa de las redes inteligentes (smart grid), buscando una integración de forma gradual; lo anterior es importante ya que debido a los cambios que provocaría en el manejo de la red pueden suscitarse problemas de regulación que son necesarios para mantener cierto control del sistema.

De acuerdo con la filosofía de las redes inteligentes, se busca que el consumidor final se involucre más en lo que es el manejo y consumo de la energía eléctrica, lo que provoca una participación en el proceso, esta se puede dar desde la fase de smart metering, donde el usuario puede controlar en tiempo real su consumo energético, asimismo el mismo puede contratar su energía con el proveedor que mejor le convenga.

En la imagen siguiente se puede observar la relación de Smart Grid con el sistema de potencia, en la gráfica las flechas representan una línea donde circulan flujos de potencia y sobre esta se tendría que dibujar otra que básicamente es una línea que representaría la comunicación entre los diferentes actores y las redes inteligentes, teniendo como resultado lograr una integración real con los actores del sistema eléctrico de potencia.

Figura 7. Estructura de smart grid



Fuente: elaboración propia, basado en: Colak, Bayindir y Sagioglu. (2020). *The effects of the smart grid system on the national grid.*

De acuerdo con Bush, S. F. ( 2014) “es posible identificar dos diferentes tipos de redes en el sistema de potencia: red del sistema de potencia y red del sistema de comunicación” (p. 17), que como se visualiza en la gráfica anterior son redes que deben ir de la mano y como ya es común en cualquier tipo de red estas se rigen bajo estándares que pueden ser consultados en diferentes normativos emitidos por IEEE, IEC y otras entidades dedicadas a realizar estándares.

## 7.5. Estructura del mercado eléctrico de Guatemala

En Guatemala se cuenta con un modelo de mercado desregularizado, proceso que se inició a mediados de los años noventa y que permitió que a la fecha se cuente con un modelo de mercado exitoso. El mercado empezó una serie de reformas en 1996, lo que permitió que el modelo de mercado se base en un modelo de costos, donde se permite la competencia y una regularización por medio de entidades independientes que permiten una clara objetividad. Luego de varias reformas, emisión de leyes (Ley general de Electricidad, Reglamento del Mercado Mayorista, entre otras) y cambios que han sucedido, el subsector eléctrico de Guatemala quedó como se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 8. Estructura del mercado eléctrico guatemalteco

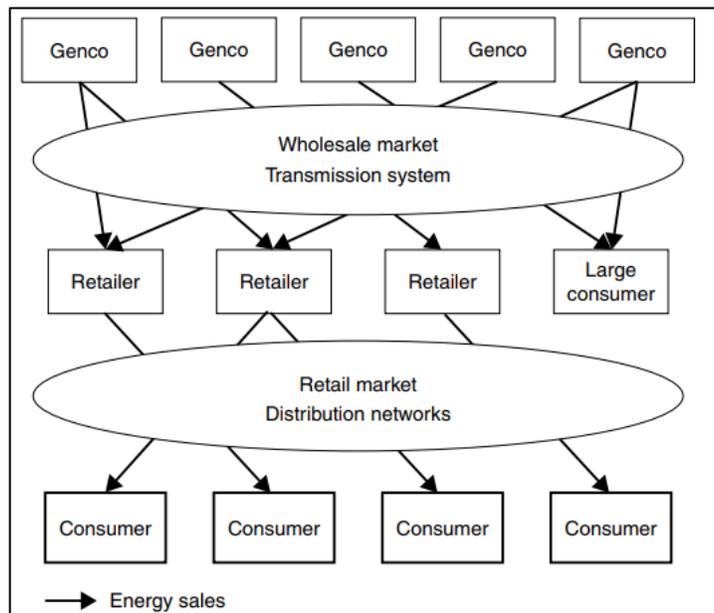


Fuente: elaboración propia, con base en información obtenida del Ministerio de Energía y Minas (2017). *Subsector eléctrico en Guatemala*. Consultado el 30 de septiembre 2020. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Subsector-EI%3%A9ctrico-en-Guatemala.pdf>

En Guatemala mediante la desregularización se origina la privatización que da como resultado la creación de diversas empresas que dieron origen a una competencia en los sectores de generación, transmisión y distribución.

Es importante conocer el mercado eléctrico guatemalteco ya que básicamente al tratar con temas como redes inteligentes y energías renovables es fundamental estar al tanto de cómo se conforma el mercado y las leyes que lo legislan para así saber si la introducción de alguna nueva tecnología produciría algún cambio o necesitaría modificaciones ya que en otros países la introducción de tecnologías como las redes inteligentes se da en el marco de mercados minoristas tales como mercados de países de Europa como Francia o países miembros del Nod Pool.

Figura 9. Estructura de mercado minorista



Fuente: Kirschen y Strbac. (2004). *Fundamentals of power system economics*.

El modelo anterior muestra cómo funciona un mercado donde el usuario puede elegir quien es su proveedor de energía y hay países donde incluso el usuario puede elegir su nodo de conexión y tiene control total de su consumo diario por hora, lo que es un gran cambio y es por eso por lo que se deben realizar estudios de impacto ya que en Guatemala una tarea como esa involucra desde actores políticos hasta usuarios finales.

“Guatemala cuenta con un mercado eléctrico maduro que permite contar con instituciones sólidas y creíbles”. (Urizar Hernández, Carmen, 2017, p.5)

La integración de FACTS en el sistema eléctrico de potencia de Guatemala depende de sus reglamentos y de cómo se programen los planes de expansión de generación y transmisión que son emitidos por el MEM y lo mismo ocurre con las centrales de generación basadas en recursos renovables y todo esto es importante si en algún momento se desea introducir las redes inteligentes, tecnología que causaría una modificación en el mercado eléctrico de Guatemala.

La regulación de tecnologías como smart grid aún está en desarrollo ya que de acuerdo con Ministerio de Energía y Minas (2019) y su política energética se busca que pueda empezar su implementación en 2023 mediante la realización de estudios de eficiencia energética, todo lo anterior en base a los planes indicativos de expansión que se elaboran en el país. De acuerdo con Santizo (2018) “en el país hoy se prepara la implementación de redes inteligentes” (p. 37), pero aún se debe trabajar en temas de regulación tales como tarifas, mejoras del mercado y evaluaciones económicas, técnicas y ambientales para determinar la viabilidad de su introducción y es aquí donde el presente trabajo de graduación sería de utilidad ya que el tema aun empieza a plantearse y es importante empezar a realizar estudios de viabilidad, especialmente que sean desarrollados independientemente, para contar con un análisis objetivo y libre de sesgos.

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### 1. INFORMACIÓN GENERAL

- 1.1. Potencia en corriente alterna
  - 1.1.1. Concepto de corriente alterna
  - 1.1.2. Pérdida de potencia en transmisión
  - 1.1.3. Fuentes de energía
  - 1.1.4. Generadores
- 1.2. Estructura del sistema eléctrico guatemalteco
  - 1.2.1. Antecedentes
  - 1.2.2. Subsector eléctrico
  - 1.2.3. Ministerio de Energía y Minas
  - 1.2.4. Comisión Nacional de Energía Eléctrica
  - 1.2.5. Administrador del Mercado Mayorista
  - 1.2.6. Mercado eléctrico guatemalteco
  - 1.2.7. Planes de expansión de generación
  - 1.2.8. Planes de expansión de transporte
  - 1.2.9. Sistemas interconectados internacionales

- 1.3. Líneas de transmisión
  - 1.3.1. Tipos de líneas de transmisión
  - 1.3.2. Circuito equivalente
  - 1.3.3. Pérdidas en líneas de transmisión
  - 1.3.4. Impedancia de entrada en las líneas
- 1.4. Sistemas de distribución
  - 1.4.1. Concepto general
  - 1.4.2. Elementos de la red de distribución
  - 1.4.3. Operadores de la red de distribución
  - 1.4.4. Normativos
  - 1.4.5. Pérdidas en el sistema de distribución
  - 1.4.6. Medición
  - 1.4.7. Problemas del sector
- 1.5. Electrónica de potencia
  - 1.3.1. Concepto básico
  - 1.3.2. Control de potencia
  - 1.3.3. Conmutación mediante semiconductores
  - 1.3.4. Aplicaciones prácticas

## 2. SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE AC

- 2.1. Definición general
- 2.2. Antecedentes
- 2.3. Objetivos principales
  - 2.3.1. Ventajas
  - 2.3.2. Desventajas
- 2.4. División y clasificación de los controladores
  - 2.4.1. Compensador estático paralelo
    - 2.4.1.1. SVC
    - 2.4.1.2. STATCOM

- 2.4.2. Compensador estático serie
  - 2.4.2.1. GCSC
  - 2.4.2.2. TSSC
  - 2.4.2.3. TCSC
  - 2.4.2.4. SSSC
- 2.4.3. Regulador de voltaje estático y ángulo de fase
  - 2.4.3.1. TCVR
  - 2.4.3.2. TCPAR
- 2.4.4. Compensadores Combinados
  - 2.4.4.1. UPFC
  - 2.4.4.2. IPFC
  - 2.4.4.3. CSC
- 2.4.5. De propósito especial
  - 2.4.5.1. Amortiguación NGH-SSR
  - 2.4.5.2. FCL
  - 2.4.5.3. TCVL
  - 2.4.5.4. TCBR
  - 2.4.5.5. SCC
  - 2.4.5.6. LCC
  - 2.4.5.7. DES
- 2.5. Forma de operación
- 2.6. Métodos de posicionamiento en la red
- 2.7. Desarrollo de proyectos con FACTS
  - 2.7.1. Metodología de planeación
  - 2.7.2. ¿Cómo desarrollar un estudio?
  - 2.7.3. Control mediante FACTS
  - 2.7.4. Aplicaciones
  - 2.7.5. Estudios de viabilidad

- 2.8. Costos de implementación
- 2.9. Análisis de costos
- 2.10. Aspectos ambientales
  - 2.10.1. Impacto ambiental al implementar FACTS
  - 2.10.2. Antecedentes de análisis ambiental
- 2.11. Aspectos Sociales
  - 2.11.1. Impacto social al implementar FACTS
  - 2.11.2. Antecedentes de análisis social
- 2.12. Modelamiento y Simulación
  - 2.12.1. Definición general
    - 2.12.1.1. ¿Qué es un modelo?
    - 2.12.1.2. Formas de modelar un controlador
  - 2.12.2. ¿Qué es simular?
    - 2.12.2.1. Definición
    - 2.12.2.2. Software para simulación
    - 2.12.2.3. Simulación de sistemas con FACTS
  - 2.12.3. Comparación de sistemas con FACTS
    - 2.12.3.1. Ventajas
    - 2.12.3.2. Desventajas
    - 2.12.3.3. Eficiencia de cada sistema
  - 2.12.4. Conclusiones de modelado y simulación

### 3. SMART GRID Y ENERGÍAS RENOVABLES

- 3.1. Smart Grid
  - 3.1.1. Definición
  - 3.1.2. Antecedentes
  - 3.1.3. Áreas de implementación
  - 3.1.4. Sistemas complementarios
  - 3.1.5. Seguridad

- 3.1.6. Smart grid y eficiencia energética
- 3.1.7. Medición y control
- 3.1.8. Normas que se aplican a smart grid
- 3.1.9. Análisis económico
- 3.1.10. Actualidad y futuro en Guatemala
- 3.2. Energías renovables
  - 3.2.1. Definición
  - 3.2.2. Tipos de energías renovables
  - 3.2.3. Análisis económico
- 3.3. Generación distribuida renovable
  - 3.3.1. Definición
  - 3.3.2. Actualidad en Guatemala
  - 3.3.3. Normativa

#### 4. INTEGRACIÓN DE FACTS Y SMART GRID

- 4.1. D-FACTS
  - 4.1.1. Definición
  - 4.1.2. Implementación
  - 4.1.3. Integración en sistemas de distribución
- 4.2. Beneficios de smart grid
- 4.3. Beneficios de las energías renovables
- 4.4. Integración de smart grid a la red
- 4.5. Análisis económico
  - 4.5.1. Costos de integración
  - 4.5.2. Inversión necesaria por tecnología
  - 4.5.3. Costos de habilitación
- 4.6. Análisis técnico
- 4.7. Análisis de impacto ambiental
- 4.8. Análisis de impacto social

4.9. Limitaciones de las tecnologías

4.10. Análisis de integración en Guatemala

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

ANEXOS

## **9. METODOLOGÍA**

En el capítulo que a continuación se desglosa se presentan las fases de estudio del trabajo de investigación, igualmente se presenta el desglose de variables que se manejarán, y el tipo de estudio en el que se centrará la investigación.

### **9.1. Características del estudio**

A continuación, se presentan las características principales del diseño de investigación, se describe el enfoque, alcance y diseño; para el desarrollo de los incisos que se presentan fue necesario un análisis de información exhaustiva de la bibliografía para poder determinar con que características se trabajará.

#### **9.1.1. Enfoque**

El trabajo de investigación se desarrollará con base en un modelo cuantitativo, debido a que se trabajará bajo la premisa de que para el cálculo de optimización y mejoras de rendimiento de una línea de transmisión se realizará análisis basado en datos numéricos disponiendo de variables que son un pilar fundamental en este tipo de enfoque.

Es importante mencionar que se contará con secciones que se desarrollarán con un modelo de investigación cualitativa ya que se buscará encontrar solución al problema planteado mediante análisis, evaluación de información recopilada por entrevistas, bibliografía, revistas científicas, tesis de maestría y/o doctorales.

### **9.1.2. Alcance**

El trabajo de investigación se centrará en un modelo descriptivo debido a que se cuenta con estos elementos que permiten dar este tipo de connotación (se analizan variables, se definen conceptos, entre otros elementos).

De acuerdo con Hernández S.(2014) “un enfoque cuantitativo puede circunscribirse en un alcance descriptivo y este a su vez puede desarrollarse con un estudio exploratorio” (p. 90).

El trabajo estrictamente será descriptivo ya que con ayuda de bibliografía se pueden detectar variables, por lo que el trabajo consistirá en buscar una relación de variables que explique el comportamiento que buscamos. Es importante recordar que, aunque el alcance con el que se describe el trabajo sea descriptivo, conforme avance la investigación de acuerdo con Hernández Sampieri (2014) este se puede tornar correlacional e incluso llegar a ser explicativo.

Para especificar el porqué de la determinación de estudio descriptivo se tomará como ejemplo: una línea de 69 Kv donde se busca determinar ciertas propiedades que nos dirán si es posible aumentar el rendimiento y capacidad de transporte al implementar ciertas nuevas tecnologías, es decir se realizará un análisis; de igual forma se puede tratar Smart Grid y las demás tecnologías que ya se han mencionado en el documento.

### **9.1.3. Diseño**

En general y en relación con los incisos anteriores, se considera que es de diseño no experimental ya que a nivel general y a lo largo de todo el desarrollo

del trabajo de investigación se emplearan valores los cuales no pueden manipularse tal y como se definen en las tablas de variables.

Es no experimental básicamente porque se observarán situaciones que existen previamente, como las líneas de transmisión, centrales de generación, y otros datos preexistentes; las variables en su mayoría no pueden ser manipuladas y se tiene conocimiento de hechos que podrían ocurrir, pero deben determinarse. Secciones específicas serán de diseño cuasiexperimental (debido a la realización de simulaciones sobre flujos de potencia) ya que fases de análisis requerirán de manipulación de variables para determinar cuál es el impacto técnico que provoca implementar innovación tecnológica.

## **9.2. Unidades de análisis**

La unidad de análisis del estudio del presente trabajo serán las líneas de transmisión y distribución, así como datos económicos, sociales y ambientales, y se puede resumir como a continuación se muestra:

- Flujos de potencia de un sistema manipulable para determinación de eficiencia de líneas de transmisión.
- Contaminación ambiental e impacto social que se crea debido a innovación tecnológica que se muestra en el diseño de investigación.
- Valores de costos e inversión necesaria para implementación de innovación tecnológica descrita anteriormente en el marco teórico.

En cuanto al análisis social la muestra se estratificará ya que se considera que existen diferentes grupos socioeconómicos en donde se desea realizar la toma de la muestra, será de manera aleatoria,

### **9.3. Variables**

Para el desarrollo del presente análisis es necesario conocer y observar las distintas variables que actúan en el proceso que se desarrollara para poder tomar una decisión sobre si la aplicación de la tecnología es viable técnica, económica y socialmente, todo esto para determinar cuán importante sería implementar nueva tecnología.

El análisis de las variables se desarrolla primero, al analizar la pregunta principal y cada una de las preguntas auxiliares, finalmente se realiza una descripción de cada una, donde se definen, cada una con sus propias dimensiones y definición.

#### **9.3.1. Pregunta principal**

¿Cuál es la viabilidad de implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna para lograr un óptimo rendimiento de líneas existentes y determinar así el posible desarrollo de las redes inteligentes y mejorar la integración de energías renovables en el país?

Tabla II. **Variable pregunta principal**

Criterio Variable	Categoría		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Politómica	Discreta	Continua			
Datos para análisis técnico				x	x		Intervalos
Datos para análisis económico				x		x	Intervalos
Datos para análisis de impacto ambiental		x				X	Intervalos
Datos para análisis de impacto social	x					X	Ordinal

Fuente: elaboración propia.

### 9.3.2. Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es la probabilidad de reducir la construcción de nueva infraestructura en el sistema de transmisión al implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS)?

Tabla III. **Variables pregunta auxiliar 1**

Criterio Variable	Categoría		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Politómica	Discreta	Continua			
Flujo de Potencia máximo de líneas Transmisión				x	X		Intervalos
Tamaño de la línea del sistema de transporte				x	x		Intervalos

Fuente: elaboración propia.

- ¿Qué posibilidad de integración tienen los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna para así desarrollar redes inteligentes y al mismo tiempo mejorar la incorporación de energías renovables mediante la mejora de calidad de potencia que proporcionan los FACTS?

Tabla IV. **Variables pregunta auxiliar 2**

Criterio Variable	Categórica		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Politómica	Discreta	Continua			
Datos económicos				x		x	Razón
% Rendimiento de la red de transmisión y distribución				x		X	Razón

Fuente: elaboración propia.

- ¿Qué impacto produce implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna en sistemas de transmisión y distribución y cómo influirá el mismo en el desarrollo de redes inteligentes y energías renovables?

Tabla V. **Variables pregunta auxiliar 3**

Criterio Variable	Categórica		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Politómica	Discreta	Continua			
% de Contaminación Ambiental				x		x	Razón

Continuación tabla V.

% aceptación social de innovación tecnológica				x		X	Razón
% mejora del sistema de Transmisión				x		X	Razón

Fuente: elaboración propia.

- ¿Cuál es la posibilidad de realizar análisis comparativo basado en experiencia de otros países, para determinar su futura implementación en Guatemala y utilizar para ello herramientas estadísticas?

Tabla VI. **Variables pregunta auxiliar 4**

Criterio Variable	Categórica		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Politómica	Discreta	Continua			
Inversión económica necesaria para implementación FACTS				x		x	Intervalos
Porcentaje de mejora de líneas de transmisión y distribución al aplicar FACTS				x		X	Razón
Cantidad de líneas de transmisión del SNI que pueden presentar mejora				x		X	Nominal

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Definición teórica y operativa de las variables

Variable	Definición	Dimensiones	Indicador
<b>Inversión Económica Necesaria para Implementar FACTS</b>	Cantidad de dinero mínima necesaria para lograr implementar FACTS en Guatemala	[\$, Q]	Información de base de datos de información obtenida de otros países y analizado mediante herramientas estadísticas y económicas para determinar inversión mínima necesaria.
<b>% de líneas de transmisión del SNI que pueden optimizarse</b>	Líneas de transmisión que pueden optimizarse mediante aplicación de FACTS	[%] [MW] [MVA] [MVAr]	Análisis en base a información proporcionada por datos del SNI y contrastada con la capacidad de conductores y flujo de potencia que circula para determinar el porcentaje de líneas que pueden optimizarse.
<b>Flujo de Potencia Máximo de Líneas de Transmisión</b>	Flujo de potencia al cual puede operar una línea de transmisión a su máxima capacidad	S[kVA] P[kW] Q[kvar] $\Delta V$ [variación de voltaje]	Variables necesarias obtenidas de estudios previos y modelación simple para posterior comparación.
<b>Tamaño de la línea del sistema transporte</b>	Longitud en km de líneas del sistema de transporte	D[km]	Información en base a estudios de PET y PEG e información de CNEE sobre SNI para determinar cuál podría ser la reducción de infraestructura.
<b>Datos económicos</b>	Información de costos de inversión, implementación y de ahorro de implementar redes inteligentes y FACTS	[\$, Q]	Datos obtenidos de estudios realizados por EPRI y otras entidades de otros países que ya han implementado estas tecnologías que servirán para comparar con datos de inversiones en Guatemala y que pueden manipularse para determinar un B/C o TIR.
<b>% de Rendimiento de la red</b>	Datos de porcentaje de rendimiento a la que opera redes de transmisión y distribución	[%]	Datos que se obtienen de estudios realizados en Guatemala y datos obtenidos de PET, PEG y CNEE contrastados con datos obtenidos de la simulación o análisis mediante herramienta de análisis numérico (octave, Matlab)
<b>% reducción de contaminación por implementación de innovación tecnológica</b>	Datos de probabilidad de reducción de contaminación al implementar innovación tecnológica.	[%]	Datos de resultados de análisis realizados en otros países con análisis realizados en nuestro país, contrastarlos y obtener un indicador para Guatemala.
<b>% de mejora del sistema de transporte y distribución</b>	Datos de probabilidad de mejora del sistema de transporte y distribución	[%]	Datos de resultados finales de las preguntas anteriores y contrastadas con resultados de otros países. (Nord Pool, Francia, Alemania)
<b>% del impacto social</b>	Información obtenida de resultados de encuesta.	[%]	Datos obtenidos mediante realización de encuestas a una pequeña muestra de población de regiones de Sacatepéquez que muestran renuencia a cualquier instalación de equipo eléctrico.

Fuente: elaboración propia.

## **9.4 Fases de estudio**

En todo proyecto de investigación es necesario establecer fases que corresponden a una descripción, de cómo se realizará el proyecto y en este caso se cuenta con 6 fases diferentes.

### **9.4.1 Fase 1: revisión de bibliografía**

En la primera fase se consultará, ordenará y analizará información bibliográfica de libros, artículos de revistas científicas, artículos científicos, documentos con información de generación, transmisión y distribución del Administrador del Mercado Mayorista (AMM), Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), Ministerio de Energía y Minas (MEM), distribuidoras, empresas de transmisión y demás empresas de energía eléctrica de Guatemala, en general información donde se puedan contemplar políticas de innovación tecnológica que se utiliza o que se planea, igualmente información sobre la capacidad de transporte actual del SNI.

### **9.4.2 Fase 2: creación de base de datos**

En la presente fase se recolectarán todos los datos e información necesaria para poder crear las bases de datos que se necesitan (información económica, ambiental, técnica y social) con el fin de analizar los mismos y sus posibles variables.

Una correcta gestión de los datos para que sean consultados con facilidad a través del uso de la herramienta Microsoft® Excel, contenida en Office 365, para ordenar información que faciliten el análisis respectivo mediante hojas y en tablas que servirán más adelante para el análisis de datos.

### **9.4.3 Fase 3: modelamiento y simulación**

En esta fase se plantea usar herramientas que en su mayoría serán de acceso libre (Open Source) y de ser necesario podría utilizarse software de paga (Matlab y Simulink); sin embargo, se espera utilizar únicamente los siguientes programas: Octave, Grid Lab-D, OpenModelica y Matpower. Mediante el uso de las herramientas necesarias se buscará determinar cuál es la eficiencia al utilizar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna en una red de transmisión de un tamaño considerable, para la presente se utilizarán los sistemas IEEE de prueba (IEEE-9, IEEE-14, IEEE-39, IEEE-57) y se manejarán distintos dispositivos, esto con el fin de establecer cuál es el porcentaje de rendimiento de mejora de las líneas. Asimismo, se modelará para determinar la integración de FACTS con Smart Grid y Energías Renovables.

### **9.4.4 Fase 4: análisis de datos**

Terminado el análisis de la fase previa se procederá a analizar los resultados de la encuesta que se utilizará para determinar el impacto social, se tomará como base una porción de población seleccionada al azar para determinar la percepción que se tiene sobre la instalación de torres de transmisión ya sea de electricidad o de telecomunicaciones, definiendo el impacto que esto puede ocasionar y que sirva como una pequeña muestra del efecto que puede resultar a nivel nacional.

Para efectuar el análisis de datos de esta fase se utilizará Microsoft® Excel, herramienta de Office 365, esto debido a la facilidad de manejo y la gran cantidad de fórmulas y métodos estadísticos que se pueden realizar con la misma. Se buscará determinar mediante software como Octave y Matlab, así como encuestas, para determinar el impacto social, económico, técnico y ambiental;

encontrar valores mínimos, medios y máximos, así como histogramas con información de la evolución de estos impactos, desde una perspectiva actual y proyectar a futuro, para determinar diferentes escenarios. Se pretende que mediante regresión lineal se pueda determinar si los valores han aumentado o se han reducido en un determinado periodo de tiempo.

#### **9.4.5 Fase 5: análisis de integración de FACTS**

Con base en los datos obtenidos de los resultados de las fases anteriores, se buscará determinar cuál es la posibilidad de integrar estas tecnologías y al mismo tiempo lograr su desarrollo en el país. En el análisis económico se tomarán datos obtenidos de bibliografía; mediante herramientas de Excel (B/C, TIR, regresión lineal, entre otros) determinar viabilidad económica y contrastar la información con la viabilidad técnica obtenida en fases previas.

#### **9.4.6 Fase 6: interpretación de resultados**

Con base en los resultados obtenidos de las fases anteriores se determinará cual es la viabilidad de introducción de la tecnología que se menciona en el presente proyecto. Es importante que las fases previas estén finalizadas para poder obtener el análisis de impacto de innovación tecnológica, sin alguna de estas fases, no se podrá determinar una posible integración de FACTS y mucho menos una integración de tecnologías (FACTS, Smart Grid y Energías Renovables).

## 9.5 Resultados esperados

Se espera obtener los siguientes resultados:

- Porcentaje de mejora de la capacidad de transporte del S.N.I mediante la integración de Sistemas Flexibles de Transmisión de AC (FACTS).
- Impacto social y ambiental que se presenta al implementar FACTS y como los mismos influirían en su integración con las redes inteligentes y las centrales generadoras de energía renovable.
- Inversión necesaria para poder incorporar las diferentes tecnologías mencionadas en el trabajo de investigación, así como la determinación de la cantidad necesaria de ejecución de innovación tecnológica para que se provoque un cambio real en la red del SNI.
- Determinar el modelo de mercado al cual se ajustaría implementar Smart Grid, así como cambios que se tendrían que realizar para poder integrar esta tecnología al SNI.
- Obtener resultados de impacto técnico mediante el uso de software de simulación y de procesamiento de métodos numéricos para determinar resultados que sean comparables con los datos de experiencias similares en otros países.
- Con los datos obtenidos en las distintas fases de desarrollo, establecer el impacto generado por la implementación de innovación tecnológica y comprobar cuál sería el mínimo de ejecución requerida para que se obtenga un resultado deseado.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se priorizará la estadística descriptiva la cual se desarrollará en un amplio trecho de la investigación, presentada en forma de tablas, gráficas y otros recursos que se consideran necesarios.

Esto se debe a la necesidad de determinar porcentajes que muestren cual es el resultado del impacto que provoca la innovación tecnológica, así como la viabilidad de implementarse en nuestro país a partir del análisis de datos obtenidos en forma de porcentaje.

Se requiere contar con datos que permita comparar o contrastar con otros previamente definidos, complementada con el cálculo que se conseguirá mediante el cálculo de parámetros obtenidos de una pequeña porción de red, que sirva como indicador de la cantidad de energía que podría circular en una línea de transmisión al implementar las tecnologías antes expuestas.

El análisis estadístico puede ser univariado, bivariado o trivariado y depende del tipo de estudio que se realice. Univariado corresponde al estudio individual de las variables, es decir se estudia una a una, por separado.

El análisis bivariado corresponde a un cruzamiento entre variables y finalmente el trivariado como su nombre lo indica incluye una tercera variable que se utiliza como de control.

Estadística descriptiva e inferencial se relacionan con el método de análisis de datos, por lo cual a continuación se enlistan las herramientas que se utilizarán para analizar la información:

- Estadística Descriptiva

- Distribución de frecuencias
  - Medidas de dispersión
  - Medidas de posición
  - Histogramas
  - Desviación típica
- Estadística Inferencial
    - Análisis probabilístico
    - Muestra aleatoria
    - Distribución muestral
    - Gráficos de Probabilidad normal

Series de tiempo: se aplicará este método para trabajar con datos recopilados de literatura variada, datos relacionados con valores económicos, valores de inversión, y datos de ampliación de innovación tecnológica durante el período comprendido entre los años 2000 al 2020 con el fin de observar la evolución de esta y así poder determinar un posible comportamiento en el futuro. Se utilizará tendencia secular, variación estacional, variación cíclica y variación irregular.

Análisis multivariado: se implementará en los datos obtenidos de flujos de potencia ya que se puede aplicar un análisis factorial donde se reducirá al estudio de datos que son relevantes al tema del proyecto, también se utilizará regresión para saber cuál es la influencia de una variable con otra y dado que se cuenta con variables dependientes e independientes, este tipo de estudios será útil. Es posible que se utilicen otros métodos, pero dependerá de cómo se dé el desarrollo del trabajo de investigación.

Prueba de normalidad: se utilizará la prueba de normalidad para observar cuanto difiere la distribución de datos observados respecto de si se diera el caso de una distribución normal al utilizar la media y desviación estándar. Para realizar el estudio de estos datos se utilizarán histogramas y curva normal con datos de confiabilidad y rendimiento de una línea de transmisión, así como con los datos obtenidos, mediante encuesta determinar el impacto social y establecer su influencia en el impacto ambiental.



## 11. CRONOGRAMA

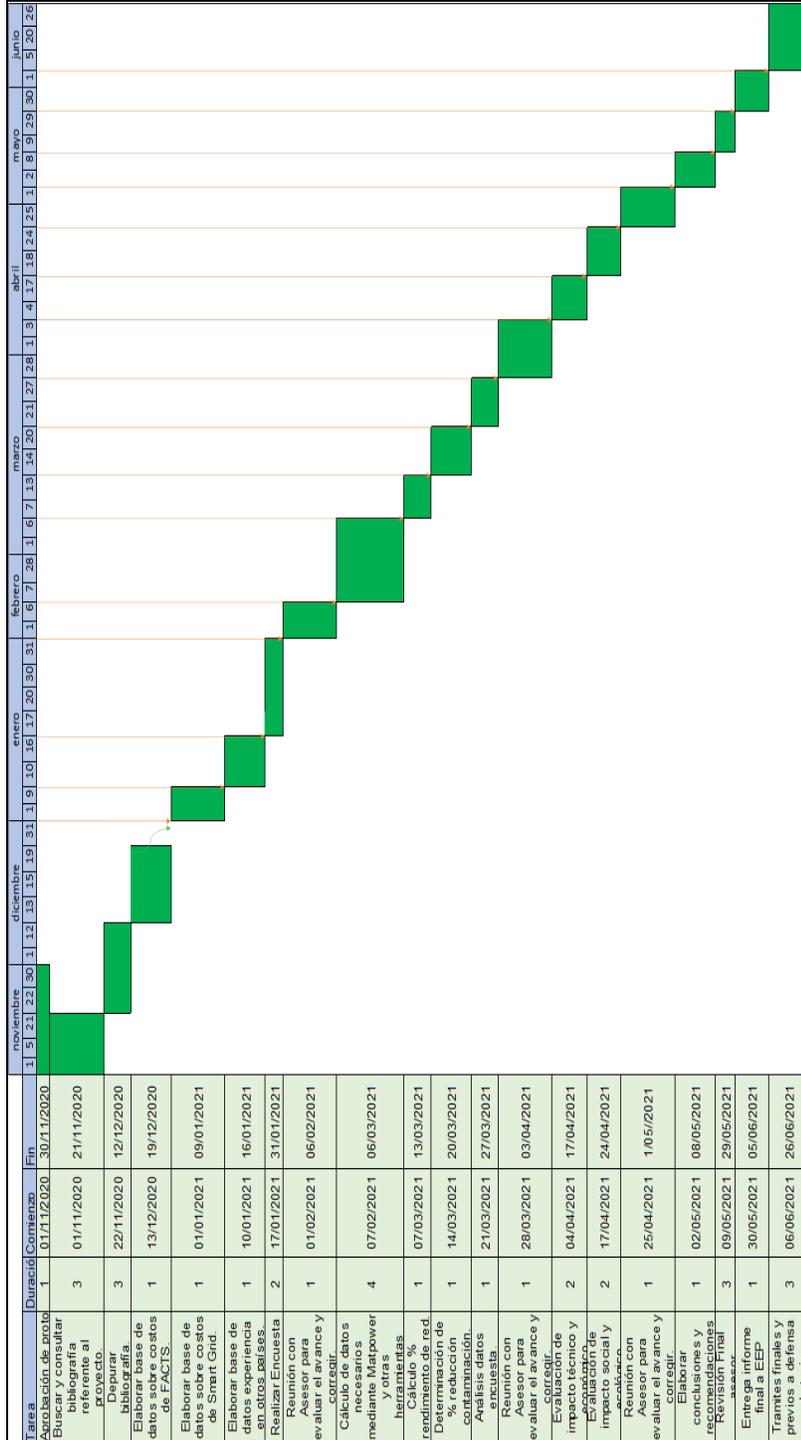
Se desglosan las actividades que se realizarán para el desarrollo del trabajo de investigación, así como las fechas en que se realizarán.

Tabla VIII. **Actividades según cronograma**

		Tarea	Duración	Comienzo	Fin
1		Aprobación de protocolo	1	01/11/2020	30/11/2020
2		Buscar y consultar bibliografía referente al proyecto.	3	01/11/2020	21/11/2020
3	Investigación Bibliográfica	Depurar bibliografía.	3	22/11/2020	12/12/2020
4		Elaborar base de datos sobre costos de FACTS.	1	13/12/2020	19/12/2020
5		Elaborar base de datos sobre costos de Smart Grid.	1	1/1/2021	9/1/2021
6		Elaborar base de datos experiencia en otros países.	1	10/1/2021	16/1/2021
7		Realizar Encuesta	2	17/1/2021	31/1/2021
8		Reunión con Asesor para evaluar el avance y corregir.	1	1/02/2021	6/02/2021
9	Analizar Datos	Cálculo de datos necesarios mediante Matpower y otras herramientas	4	7/02/2021	6/03/2021
10		Cálculo % rendimiento de red.	1	7/03/2021	13/03/2021
11		Determinación de % reducción contaminación.	1	14/03/2021	20/03/2021
12		Análisis datos encuesta.	1	21/03/2021	27/03/2021
13		Reunión con Asesor para evaluar el avance y corregir.	1	28/03/2021	3/04/2021
14	Resultados	Evaluación de impacto técnico y económico.	2	4/04/2021	17/04/2021
15		Evaluación de impacto social y ecológico.	2	17/04/2021	24/04/2021
16		Reunión con Asesor para evaluar el avance y corregir.	1	25/04/2021	1/05//2021
17		Elaborar conclusiones y recomendaciones	1	2/05/2021	8/05/2021
18		Revisión Final asesor	3	9/05/2021	29/05/2021
19		Entrega informe final a E.E.P.	1	30/05/2021	5/06/2021
20		Tramites finales y previos a defensa de tesis.	3	6/06/2021	26/06/2021

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Cronograma



Fuente: elaboración propia.

## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente proyecto se puede considerar factible debido a que la mayoría de las herramientas con las que se elaborará el análisis de datos y cálculos necesarios en las distintas etapas del proyecto, en su mayoría se realizará sobre una base de software libre, por lo que los costos serán mínimos.

Tabla IX. **Recursos necesarios**

No.	Recurso	Descripción	Costo Unitario [Q]	Cantidad	Total [Q]	Porcentaje [%]
1	Mobiliario y Equipo	Computadora, impresora, etc.	2000.00	1	2000.00	23
2	Útiles escolares y de oficina	Libros, cuadernos, etc.	200.00	1	200.00	2
3	Combustible	Gasolina Super para movilización en automóvil.	100.00	8	800.00	9
4	Vehículo	Reparaciones y varios.	1000.00	1	1000.00	12
5	Energía Eléctrica	Suministro Mensual de acuerdo con el uso promedio de la computadora.	30.00	8	240.00	3
6	Honorarios Asesor	Costo que requerirá el asesor.	100.00	4	400.00	5
7	Software	Software que podría requerirse.	1000.00	1	1000.00	12
8	Bibliografía	Si es necesaria la adquisición de bibliografía de paga.	1000.00	1	1000.00	12
9	Imprevistos	Ante cualquier eventualidad que pueda surgir	1860.00	1	1860.00	22
<b>TOTAL</b>					8500	100
<b>Presupuesto Total</b>					8500.00	

Fuente: elaboración propia.



### 13. REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista (2019). *Reporte estadístico 2019*. Recuperado el 20 de agosto de 2020, de <https://www.amm.org.gt>.
2. Bose, Bimal K. (2019). *Power electronics in renewable energy systems and smart grid: Technology and applications*. [Electrónica de potencia en sistemas de energía renovable y redes inteligentes: Tecnología y aplicaciones] Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons.
3. Bush, Stephen F. (2014). *Smart Grid: Communication-enabled intelligence for the electric power grid*. [Smart grid: Comunicación-habilitada, inteligencia para red eléctrica de potencia]. Chichester, The Atrium, Southern Gate, Reino Unido: John Wiley and Sons.
4. Colak, Ilhami; Bayindir, Ramazan; Sagioglu, Seref. (2020, junio). The Effects of the Smart Grid System on the National Grids. [Los efectos del sistema de redes inteligentes en las redes nacionales]. *En IEEE 8th International Conference on Smart Grid*. (pp. 122-126). IEEE.
5. Feltes, J., Gemmell, B., y Retzmann, D. (2011, julio). From smart grid to super grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources. [De Redes Inteligentes a Super Red: Soluciones con HVDC y FACTS para acceso a la red de fuentes de energía renovable]. *En 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. (pp. 1-6). IEEE.

6. Gellings, C. (2011). Estimating the costs and benefits of the smart grid: a preliminary estimate of the investment requirements and the resultant benefits of a fully functioning smart grid. [Estimando los costos y beneficios de la red inteligente: un estimado preliminar de los requerimientos de inversión y los beneficios resultantes de una red inteligente completamente funcional]. *Electric Power Research Institute (EPRI), Technical Report (1022519), 1.*
7. Hernández Sampieri, Roberto. (2014). *Metodología de la Investigación*. Ciudad de México, México: Mc-Graw Hill Educación.
8. Hingorani, N. y Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. [FACTS, Conceptos y Tecnología de Sistemas Flexibles de Transmisión de AC]. IEEE press.
9. IRENA. (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*. [Costos de Generación de Energía Renovable en 2019]. Recuperado el 20 de septiembre de 2020, de <https://www.irena.org>
10. Kirschen, Daniel S.; Strbac, Goran. (2004). *Fundamentals of Power System Economics*. [Fundamentos Económicos del sistema de Potencia]. (Wiley, Ed.) West Sussex, Inglaterra: John Wiley and Sons, Ltd.
11. Meier. (2014). Enabling digital substations: The smarter grid needs a smarter substation, and it has to be digital [Habilitación de subestaciones digitales: La red más inteligente necesita una

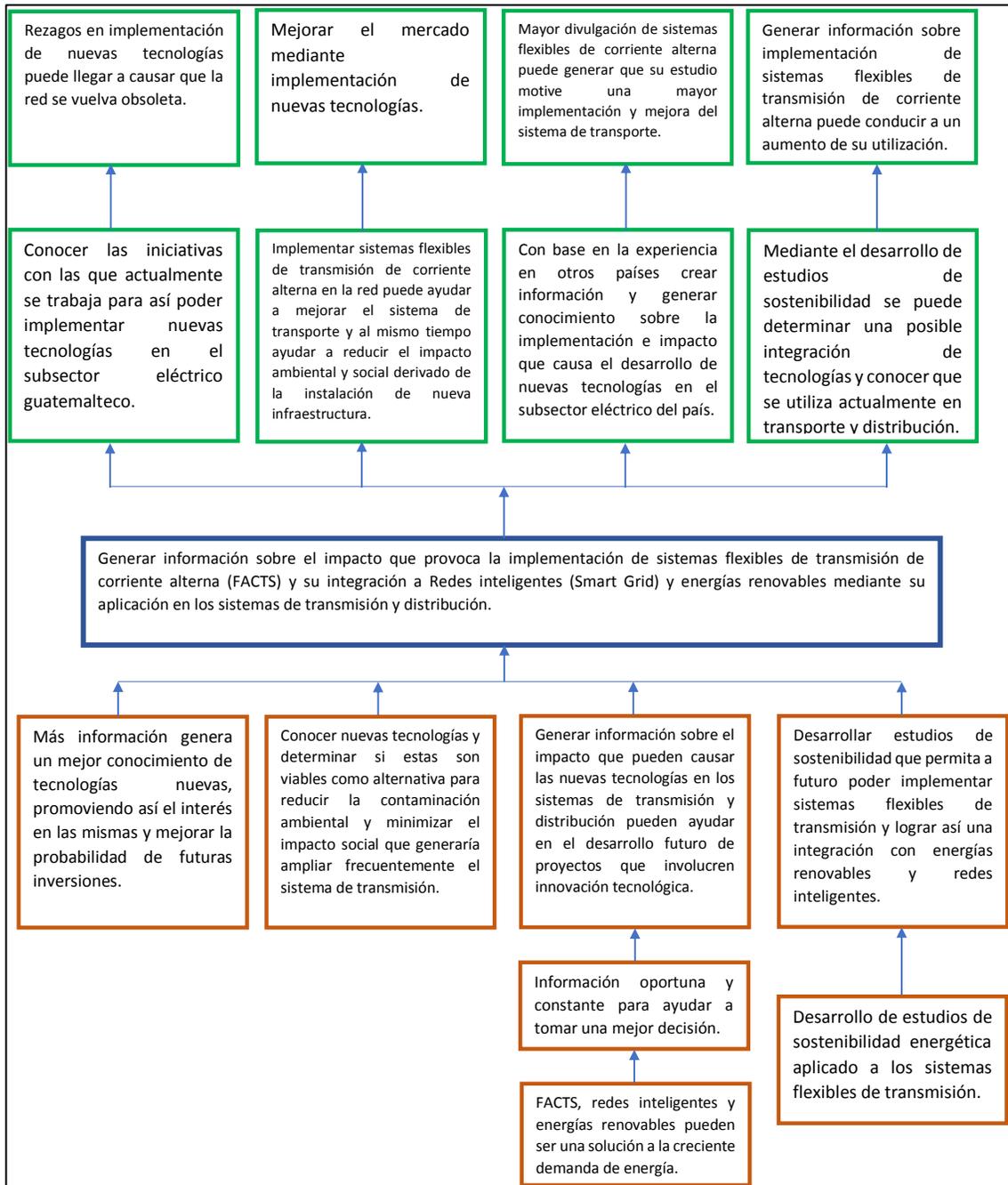
- subestación más inteligente y tien que ser digital]. *ABB review*, 4 (14), 6-10. Recuperado de: <https://library.e.abb.com>
12. Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Política Energética 2019-2050*. Guatemala, Guatemala: Gobierno de la República de Guatemala. Recuperado el 25 de septiembre de 2020, de [www.mem.gob.gt](http://www.mem.gob.gt).
  13. Ministerio de Energía y Minas. (2017, julio). *Subsector eléctrico en Guatemala*. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Subsector-EI%C3%A9ctrico-en-Guatemala.pdf>.
  14. Mohan Ned, Mohan, N., Undeland, T. y Robbins, W. (2009). *ELECTRÓNICA DE POTENCIA. Convertidores, Aplicaciones y Diseño*. (3a. ed.). (D. T. Bartenbach, Trad.) Mc Graw Hill Educación.
  15. Pérez, F. (2016). Sistemas de Transmisión flexible en corriente alterna. *Prisma Tecnológico*. 4(1), 25-28.
  16. Phase-Shifting transformers (PST). (2020). Recuperado de <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/transformers/power-transformers/system-intertie-transformers/phase-shifting-transformers>
  17. Yu, Q. (2014, agosto). Applications of flexible AC transmissions system (FACTS) technology in SmartGrid and its EMC impact. [Aplicaciones de tecnología de Sistemas Flexibles de Transmisión de AC (FACTS) en redes inteligentes y su impacto EMC]. En 2014

IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC) (pp.392-397). IEEE.

18. Rashid, M. (1993). *Electrónica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. (2a. ed.). (I. G. García, Trad.) Prentice Hall Hispanoamericana.
19. Santizo, M. A. (2018). *Sector Eléctrico Guatemala*. Recuperado el 12 de agosto de 2020, de [http://eventoscocier.org/2016/jornada\\_tarifas/images/Presentaciones/CNEE.pdf](http://eventoscocier.org/2016/jornada_tarifas/images/Presentaciones/CNEE.pdf).
20. Schlabbach, J., Rofalski, K.H. (2014). *Power System Engineering. [Ingeniería de Sistemas de Potencia]*. Weinheim, Germany: John Wiley and sons.
21. Urizar Hernández, Carmen. (2017). *La Exitosa Apertura del Mercado Eléctrico Guatemalteco*. Col. San Ángel, México: Alianza para Centroamérica en colaboración con fundación Friedrich Naumann.

# 14. APÉNDICES

## Apéndice 1. Árbol de objetivos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Matriz de coherencia

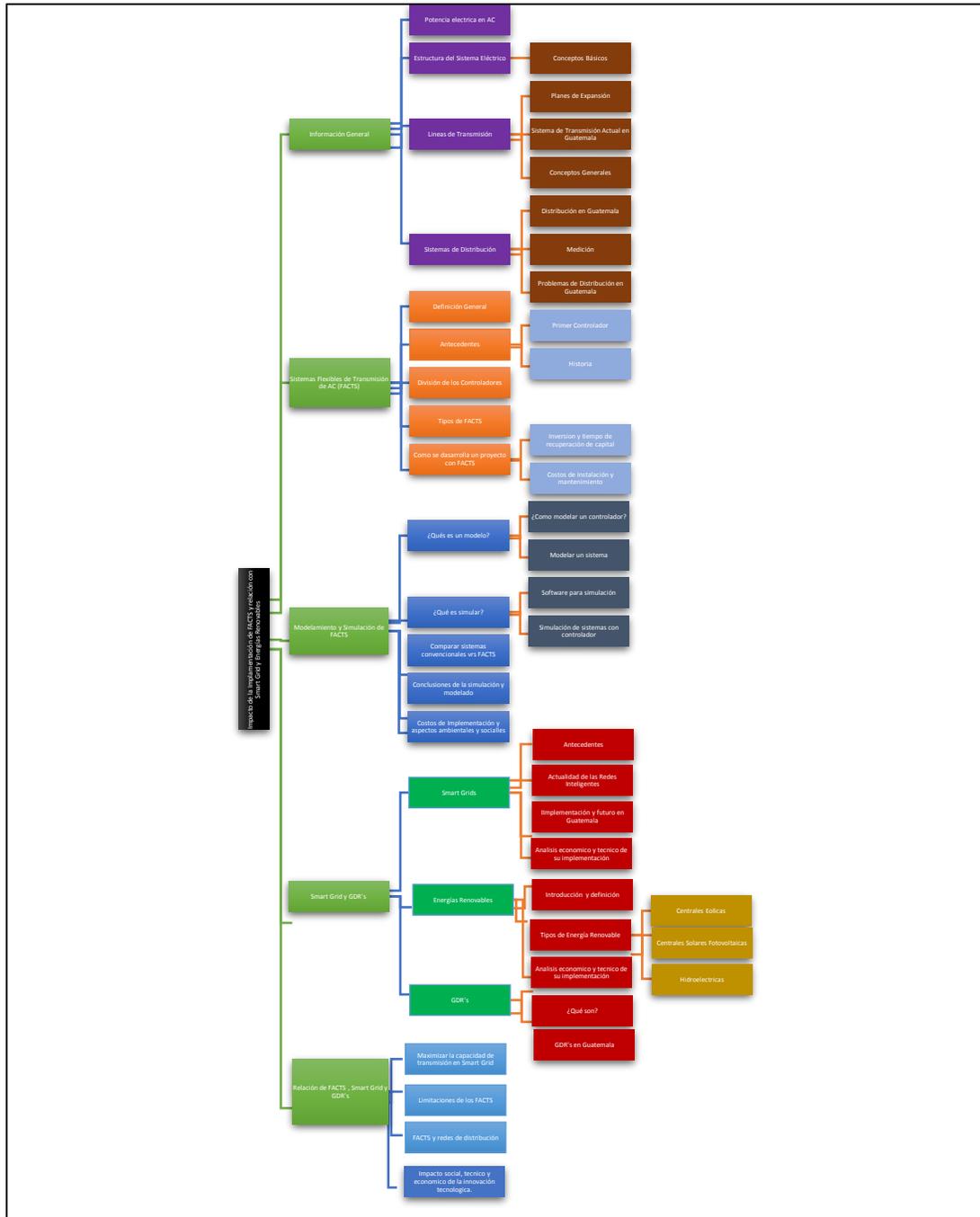
TEMA	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN E. E. P	PROBLEMA	PREGUNTAS	OBJETIVOS
<b>ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL DESARROLLO DE SMART GRID Y ENERGÍAS RENOVABLES MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA.</b>	<p>4)Nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica.</p> <p>c. Análisis e impactos de la innovación tecnológica</p>	<p>Información limitada sobre el impacto que provoca el implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna y su integración a redes inteligentes y energías renovables mediante su aplicación en los sistemas de transmisión y distribución del subsector eléctrico del país.</p>	<b>PREGUNTA PRINCIPAL</b> ¿Cuál es la viabilidad de implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna para lograr un óptimo rendimiento de líneas existentes y mediante su optimización determinar si es posible el desarrollo de las redes inteligentes y energías renovables en el país?	<b>GENERAL</b> Identificar la viabilidad de implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna para obtener un óptimo rendimiento de líneas de transmisión existentes y determinar el posible desarrollo de redes inteligentes y Energías Renovables mediante su integración en el sistema de distribución y transporte de Guatemala.
			<b>PREGUNTAS SECUNDARIAS</b> ¿Cuál es la probabilidad de reducir la construcción de infraestructura nueva en el sistema de transmisión mediante la implementación de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS)?	<b>ESPECÍFICOS</b> Determinar, si mediante la implementación de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna se puede reducir la construcción de infraestructura y a la vez mejorar la eficiencia del sistema de transporte.

Continuación apéndice 2.

			<p>¿Qué posibilidad tienen los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna de lograr una integración en los sistemas de distribución para así conseguir desarrollar redes inteligentes y mejorar la integración de energías renovables?</p>	<p>Determinar cuál es la posibilidad de integración de redes inteligentes y energías renovables con los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna mediante análisis de datos obtenidos en estudios realizados en otros países.</p>
			<p>¿Qué impacto produce la implementación de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna en los sistemas de transmisión y distribución y cómo influirá el mismo en el desarrollo de redes inteligentes y energías renovables?</p>	<p>Establecer el impacto que se produce al implementar sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna en los sistemas de transmisión y distribución de Guatemala con el fin de determinar su integración con energías renovables y redes inteligentes.</p>
			<p>¿Cuál es la posibilidad de realizar un análisis comparativo basado en experiencia de otros países, para determinar su futura implementación en Guatemala mediante realización de análisis?</p>	<p>Analizar si mediante la utilización de datos obtenidos de la experiencia de implementación de Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna en países de Europa y Latinoamérica es posible determinar la viabilidad de su implementación en Guatemala y su posible integración a la red de transmisión y distribución del S.N.I.</p>

Fuente: elaboración propia.

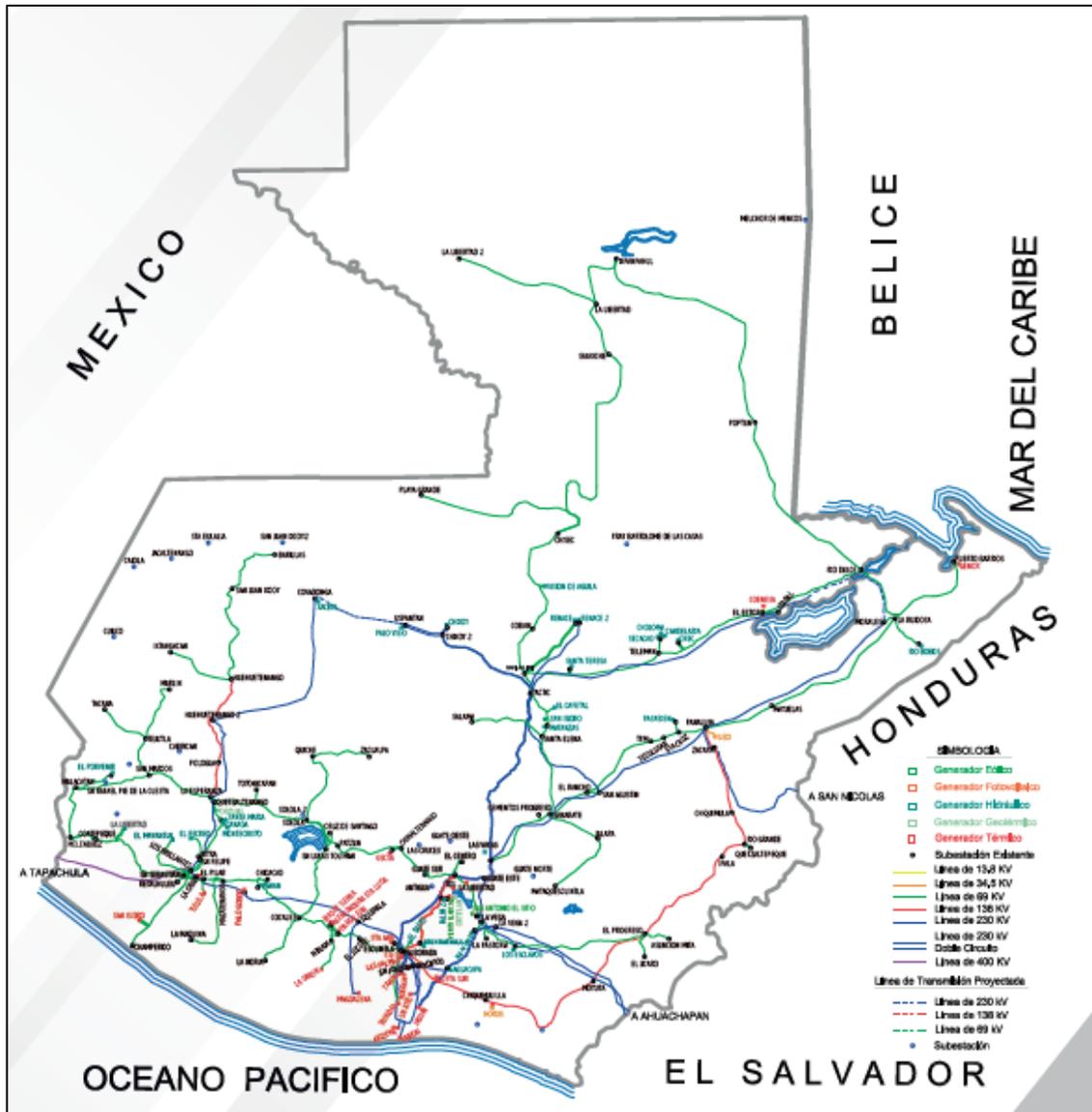
### Apéndice 3. Mapeo



Fuente: elaboración propia.

# 15. ANEXOS

## Anexo 1. Sistema nacional interconectado



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. (2019). *Informe Estadístico 2019*.

