



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA DEL SNI DE  
GUATEMALA ANTE UNA DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA DE CARGA POR BAJA  
FRECUENCIA**

**Luis Gustavo Monzón López**

Asesorado por la M.Sc. Inga. Ismelda Isabel López Tohom

Guatemala, enero de 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA DEL SNI DE  
GUATEMALA ANTE UNA DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA DE CARGA POR BAJA  
FRECUENCIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUIS GUSTAVO MONZON LOPEZ**

ASESORADO POR LA M.SC. INGA. ISMELDA ISABEL LÓPEZ TOHOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ENERO DE 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Angeles
SECRETARIA	Ing. Lesbia Magalí Herrera López



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA DEL SNI DE GUATEMALA ANTE UNA DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 6 de agosto de 2022.

**Luis Gustavo Monzón López**



**EEPFI-PP-1617-2022**

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

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

**Estimado Ing. Rivera**

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

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA DEL SNI DE GUATEMALA ANTE UNA DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Energías renovables e incidencia en la matriz energética de Guatemala. - Estructura y dinámica del mercado eléctrico y sus impactos en la economía nacional y global**, presentado por el estudiante **Luis Gustavo Monzón López** carné número **201513785**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion De Mercados Electricos Regulados.

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

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

Isabel Lopez

Firmado digitalmente por Isabel Lopez  
DN: cn=Isabel Lopez, o=Isabel Lopez,  
c=Guatemala, h=GT, ou=UMG,  
e=isabelopez@gmail.com  
Motivo: Soy el autor de este documento  
Ubicación:  
Fecha: 2022.11.08 10:01:06-06

Inga. Isabel López Tohom  
Col. 5843

Mtra. Ismelda Isabel López Tohom  
Asesor(a)

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



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







EEP-EIME-1383-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA DEL SNI DE GUATEMALA ANTE UNA DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Gustavo Monzón López**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

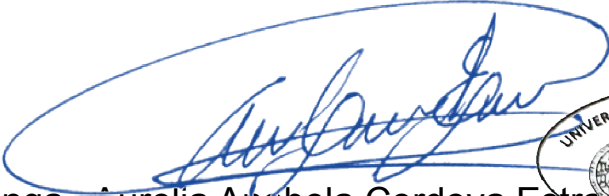
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica


Guatemala, noviembre de 2022

LNG.DECANATO.OI.080.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA DEL SNI DE GUATEMALA ANTE UNA DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA**, presentado por: **Luis Gustavo Monzón López**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por haberme dado la sabiduría y el conocimiento para poder finalizar una etapa más de mi vida.
- Mis padres** Por haberme dado la vida, cuidarme y enseñarme a salir adelante a pesar de las dificultades de la vida, sin su apoyo incondicional no hubiera podido llegar hasta en donde estoy.
- Mi esposa** Alejandra Morales por ser mi compañera de vida y parte motivadora e inspiradora para avanzar en mi carrera profesional.
- Mis hermanos** Rene, Gabriela y Emily Monzón por apoyarme y aconsejarme a lo largo de mi vida.
- Mis abuelos** Reinerio López y Raquel de Paz por creer en mí y sus sabios consejos que me acompañaran toda la vida.
- Mi Familia** A todos los miembros de mi familia, porque siempre hay un momento alegre o un consejo por compartir cada vez que nos reunimos y sus muestras de apoyo.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitirme formarme académicamente para tener herramientas en mi desempeño profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme el conocimiento que me llevo a desarrollar con éxito este trabajo de investigación.
<b>Pueblo de Guatemala</b>	Por haberme brindado la oportunidad de una educación a nivel superior gratuita.
<b>Mis amigos de la facultad</b>	A todos mis amigos en general con los que he compartido buenos momentos y que en algún momento me apoyaron.
<b>Mi asesor</b>	Msc. Ing. Ismelda Isabel López Tohom, por haberme brindado su apoyo y consejos durante el desarrollo de este trabajo de graduación.
<b>M.A. Inga. Ana Lucía Martínez</b>	Por todo el apoyo brindado y los consejos durante la elaboración de este trabajo de graduación.
<b>Amigos en general</b>	Por compartirme su amistad, buenos momentos y alegrías.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
3.1. Contexto general .....	7
3.2. Descripción del problema .....	8
3.3. Formulación del problema .....	9
3.4. Delimitación del problema .....	10
4. JUSTIFICACIÓN .....	13
5. OBJETIVOS .....	15
5.1. General.....	15
5.2. Específicos .....	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	17
7. MARCO TEÓRICO.....	19
7.1. Teoría de la resiliencia.....	19



7.1.1.	Modelos teóricos de la resiliencia.....	20
7.1.1.1.	Modelo de estabilidad .....	20
7.1.1.2.	Modelo de interferencia.....	21
7.1.1.3.	Modelo de transformación.....	21
7.1.1.4.	Modelo de expansión .....	21
7.2.	Resiliencia en sistemas eléctricos.....	21
7.2.1.	Definición.....	21
7.2.2.	Tipos de resiliencia en sistemas eléctricos.....	22
7.2.2.1.	Resiliencia operacional.....	22
7.2.2.2.	Resiliencia de infraestructura .....	22
7.2.3.	Métricas de resiliencia.....	23
7.2.4.	Acciones de resiliencia.....	27
7.3.	Contingencias del SNI.....	28
7.3.1.	Definiciones.....	28
7.3.2.	Tipos de contingencias.....	28
7.3.3.	Riesgos de ocurrencia de contingencias.....	29
7.4.	Estabilidad y regulación de frecuencia.....	29
7.4.1.	Estabilidad angular.....	29
7.4.1.1.	Estabilidad ante pequeños disturbios..	30
7.4.1.2.	Estabilidad ante grandes disturbios.....	31
7.4.2.	Estabilidad de frecuencia .....	31
7.4.3.	Límites de frecuencia .....	32
7.4.4.	Modelado de carga del sistema eléctrico .....	33
7.4.4.1.	Modelo del generador síncrono.....	33
7.4.5.	Regulación de frecuencia.....	34
7.4.5.1.	Regulación primaria .....	34
7.4.5.2.	Regulación secundaria.....	34
7.4.5.3.	Reducción de voltaje .....	35
7.4.5.4.	Reducción de carga .....	35

7.4.5.5.	Desconexión automática por baja frecuencia .....	35
7.4.6.	Tipos de respuesta ante la desviación de frecuencia .....	36
7.4.7.	Despacho de generación .....	37
7.5.	Esquemas de protección .....	37
7.5.1.	Definición .....	38
7.5.2.	Clasificación de los esquemas de protección .....	38
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	39
9.	METODOLOGÍA.....	43
9.1.	Características del estudio .....	43
9.1.1.	Diseño .....	43
9.1.2.	Enfoque .....	44
9.1.3.	Alcance .....	44
9.2.	Unidad de análisis. ....	45
9.3.	Variables.....	45
9.4.	Fases del desarrollo de la investigación .....	47
9.4.1.	Fase I. Revisión documental.....	47
9.4.2.	Fase II. Recopilación de informes de desconexión automática de carga por baja frecuencia del 2021 al 2022 .....	48
9.4.3.	Fase III. Análisis de datos para determinar el tiempo y la carga afectada de la ocurrencia de eventos .....	48
9.4.4.	Fase IV. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar la relación del tiempo	

	de recuperación con las operaciones implementadas.....	49
9.4.5.	Fase V. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para obtener el área resiliente trapezoidal como indicativo de la cantidad de degradación de la resiliencia en las fases y su evolución en el tiempo.....	49
9.4.6.	Resultados esperados.....	50
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	53
10.1.	Análisis aritmético y algebraico .....	53
10.2.	Análisis estadístico.....	54
11.	CRONOGRAMA .....	55
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	57
13.	REFERENCIAS .....	59
14.	APÉNDICES .....	63

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Comportamiento de la resiliencia de un sistema eléctrico, curva trapezoidal con un evento perturbador.....	23
2.	Torque aplicado en el eje de un generador.....	30
3.	Relación entre frecuencia, carga y generación .....	33
4.	Cronograma de actividades .....	55

### TABLAS

I.	Descripción de las variables en estudio .....	45
II.	VARIABLES e indicadores .....	46
III.	Resultados esperados.....	50
IV.	Recursos necesarios.....	57



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\delta$	Ángulo de carga o ángulo del rotor
$A_{rt}$	Área trapezoidal de la resiliencia
<b>GEGC</b>	Cantidad de capacidad de generación
$G_{i,s}$	Capacidad disponible de la central de generación $i$ por escenario de contingencia
<b>H</b>	Constante de inercia
<b>D</b>	Constante de la relación entre la variación de frecuencia y el incremento de potencia.
$\Lambda$	Degradación del nivel de resiliencia
$D_{n,s}$	Demanda conectada en $n$ por escenario de contingencia
<b>DCE</b>	Demanda de la carga
$\in$	Es elemento de
$K_d$	Factor de amortiguación
Hz	Hertz
H	Hora
$\Delta P_i$	Incremento de potencia independiente de la Frecuencia
$\int$	Integral
<b>MW</b>	Megavatio
<b>MWh</b>	Megavatio-hora
<b>MW/h</b>	Megavatio por hora
<b>J</b>	Momento de inercia

<b>NS</b>	Número de escenarios de contingencias
<b><math>\Phi</math></b>	Pendiente de degradación
<b><math>\Pi</math></b>	Pendiente de restauración
<b>%</b>	Porcentaje
<b><math>P_e</math></b>	Potencia electromagnética
<b><math>P_m</math></b>	Potencia mecánica
<b><math>\Delta P_e</math></b>	Relación entre el incremento de demanda total
<b><math>R_{op}</math></b>	Resiliencia operacional
<b><math>R_{pdo}</math></b>	Resiliencia post perturbación
<b><math>R_{0o}</math></b>	Resiliencia previa a la perturbación
<b><math>\Sigma</math></b>	Sumatoria
<b>E</b>	Tiempo en el que sistema permanece degradado
<b><math>T_{or}</math></b>	Tiempo final de la restauración
<b><math>t_{ee}</math></b>	Tiempo final del evento
<b><math>t_{oe}</math></b>	Tiempo inicial del evento
<b><math>t_{or}</math></b>	Tiempo previo a la restauración del sistema
<b><math>T_e</math></b>	Torque eléctrico
<b><math>T_m</math></b>	Torque mecánico
<b><math>\Delta\omega</math></b>	Velocidad angular

## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista.
<b>APBI</b>	Alta probabilidad bajo impacto.
<b>BPAI</b>	Baja probabilidad alto impacto.
<b>CNEE</b>	Comisión nacional de energía eléctrica.
<b>CRIE</b>	Comisión regional de interconexión eléctrica.
<b>CTI</b>	Cambios automáticos de topología por disparos en interruptores.
<b>CTL</b>	Cambio automático de topología por disparos de línea.
<b>CTTT</b>	Cambios automáticos de topología por disparo de transformadores.
<b>DAC</b>	Disparos automáticos de carga.
<b>DAG</b>	Disparo automático de generación.
<b>DAI</b>	Disparos automáticos de interruptores.
<b>DAL</b>	Disparo automático de línea.



<b>DRM</b>	Disparos y recierres monopolares.
<b>ECC</b>	Esquemas de desconexión o conexión automática de capacitores.
<b>ECR</b>	Esquemas complementarios de desconexión o conexión automática de reactores
<b>EOR</b>	Ente operador regional
<b>Excel</b>	Software para análisis de datos
<b>FFR</b>	Sistemas de respuesta de frecuencia rápida.
<b>IEEE</b>	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos
<b>MER</b>	Mercado eléctrico regional.
<b>Power Bi desktop</b>	Software para análisis de datos.
<b>Resiliencia</b>	Capacidad de adaptación a situaciones adversas.
<b>RRa</b>	Reserva rápida.
<b>SER</b>	Sistema eléctrico regional.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado.

**VPP**

Plantas virtuales de control remoto

**WBCSD**

*World Business Council for Sustainable Development*



## RESUMEN

Actualmente las amenazas del cambio climático y los desastres naturales tienen un gran impacto en los sistemas eléctricos de potencia afectando la continuidad del servicio de energía eléctrica. Hay algunos eventos con baja probabilidad de ocurrencia pero que han causado apagones generales a nivel mundial afectando la economía de los países, es por ello que la resiliencia en sistemas energéticos ha tomado importancia en los últimos años ya que define la capacidad de los sistemas para restaurarse ante disturbios de corta o larga duración.

El análisis de resiliencia combina diferentes métricas y metodologías para evaluar los eventos que afectan los sistemas eléctricos, los que se asocian principalmente a estudios de seguridad energética y confiabilidad del suministro. En estos estudios se evalúan las fases del desarrollo de una contingencia y su comportamiento en el tiempo midiendo la resiliencia en cada etapa a través de indicadores que ayudan a cuantificarla.

El objetivo de este estudio es analizar la resiliencia del SNI de Guatemala ante una desconexión automática de carga por baja frecuencia para proponer acciones preventivas que ayuden a minimizar los tiempos de recuperación ante estas contingencias, realizando un análisis de los tiempos de afectación del sistema, la cantidad de carga desconectada y las operaciones requeridas para equilibrar el sistema desde un estado degradado hasta un punto restaurativo.



# 1. INTRODUCCIÓN

La teoría de resiliencia se ha utilizado en diferentes disciplinas y ha tomado relevancia no solo para preservar las características de un sistema también para fortalecerse ante eventualidades contrarias al funcionamiento de este; en los últimos años derivado de los cambios climáticos este concepto también se ha aplicado a sistemas eléctricos, con la finalidad de tomar medidas para reducir impactos negativos en la infraestructura y operación de la red eléctrica.

Es por lo que este estudio analiza la resiliencia del SNI de Guatemala ante una contingencia que genere una desconexión automática de carga por baja frecuencia, analizando el comportamiento del sistema antes, durante y después de ocurrida una falla para proponer mejoras que minimicen el tiempo de recuperación del mismo.

En el primer capítulo se presentan los estudios previos que muestran la importancia de realizar investigaciones asociadas a temas de resiliencia en sistemas eléctricos, en donde se muestran los riesgos a los cuales estos se ven expuestos y las soluciones que se han propuesto para mantener la estabilidad en el funcionamiento de las redes eléctricas.

En el segundo capítulo se muestran los conceptos asociados a la investigación a través del marco teórico, en el que se refuerza la teoría de la resiliencia y las ecuaciones necesarias para cuantificarla. Además, se muestra el funcionamiento de forma general de un sistema eléctrico, para comprender la estabilidad y las respuestas ante contingencias que alteran su operación normal,

así mismo algunos de los sistemas de protección y las nuevas tecnologías que se pueden aplicar para aumentar la robustez de este.

En el tercer capítulo se analiza la metodología a seguir para resolver la problemática que se plantea, además se presentan las técnicas de estudio que se utilizará para la recolección y el análisis de los datos que servirá para mostrar los resultados con los que se puedan concluir las propuestas y recomendaciones en base a la teoría presentada.

Por último, en el cuarto capítulo se presentan los resultados del análisis de la evaluación de estos realizando gráficas y comparaciones con la finalidad de concluir y dar respuesta a la problemática planteada además resaltar la importancia de incluir este tipo de estudio en el mercado eléctrico de Guatemala.

## 2. ANTECEDENTES

El análisis de la resiliencia en sistemas eléctricos es un concepto relativamente nuevo por lo que aún no existe una definición clara. Sin embargo, de forma general analiza la resistencia de un sistema y como este es capaz de recuperarse rápidamente ante contingencias que afecten su operación normal además de adaptarse para futuras contingencias.

En la tesis “Operación y planificación resiliente de redes de transmisión eléctrica” (Cruz, 2018) se modelan los riesgos a los cuales se ven expuestos los sistemas eléctricos desde la generación hasta la transmisión, analizando que tan probable es que ocurran los eventos. Dado que esta investigación se desarrolló en Chile, se analizaron los escenarios en los que el sistema se encontraban operando de forma óptima, pero bajo condiciones de actividad sísmica que someten a este país, los cuales buscaban determinar el impacto a la red considerando los elementos más susceptibles a fallar para aumentar la resiliencia de la infraestructura del sistema ante estos eventos, considerándolos como parte en los planes de expansión.

Si bien es cierto, en Centro América los sistemas eléctricos son más afectados por las variaciones climáticas, se puede analizar la resiliencia actual del SIN para proponer mejoras en la estructura, tal que ante eventualidades que afecten la operación normal se pueda recuperar rápidamente a un costo mínimo de operación.

Según Paredes, Serrano y Molina (2020) la resiliencia en sistemas eléctricos se divide en dos áreas de estudio: la resiliencia operacional y la



resiliencia de infraestructura. La resiliencia operacional se refiere a la garantía con la cual los sistemas eléctricos de potencia trabajarán de manera ininterrumpida ante una contingencia, mientras que la resiliencia de infraestructura se refiere a la resistencia física de los equipos que conforman un sistema, tal que sea capaz de minimizar los daños.

Dentro de este estudio se analizan tres fases de la resiliencia en una curva trapezoidal: la fase I en donde se inicia con la perturbación del sistema, la fase II en la cual el sistema se encuentra en un estado degradado y la fase III la cual es el estado de recuperación tanto para la resiliencia operacional como para la resiliencia de infraestructura.

Las desconexiones de carga por contingencias de baja frecuencia en el sistema nacional interconectado de Guatemala y los efectos de los cambios climáticos demuestran la importancia de realizar estos estudios con la finalidad de determinar los impactos del funcionamiento anormal del sistema, evaluando los daños, la severidad de las contingencias por baja frecuencia y las acciones de recuperación del sistema después de las perturbaciones.

En el artículo “Resiliencia y vulnerabilidad de sistemas eléctricos” (Cárdenas y Arias 2021) se realiza un análisis del comportamiento en sistemas eléctricos ante eventos que amenazan el funcionamiento normal de la red, estableciendo algoritmos de gestión, los cuales proponen estrategias y secuencias en la operación. Durante el estudio se simularon escenarios de eventos que se pueden presentar en los sistemas eléctricos principalmente los del tipo APBI (alta probabilidad bajo impacto) asociados a las fallas propias de los equipos por envejecimiento, corrosión, suciedad, entre otros; y, las fallas del tipo BPAI (baja probabilidad alto impacto) relacionados a los efectos de las condiciones climáticas y los desastres naturales. El estudio propone utilizar plantas virtuales

o VPP para el control remoto y la regulación de la generación distribuida, los sistemas de almacenamiento y la carga controlada de los usuarios como una propuesta de solución.

La infraestructura del sistema nacional interconectado de Guatemala constantemente se encuentra en crecimiento, por lo que incursionar en nuevas investigaciones asociadas a la calidad del servicio en cumplimiento a las políticas planteadas, ayudarán a las propuestas de los planes de acción para regular la reducción de la vulnerabilidad de este, utilizando este tipo de tecnologías para la mejora en la operación.

En el trabajo de Dai, Preece y Panteli (2022) abordan la evaluación de riesgos de fallas en cascada de sistemas de potencia analizan cómo la integración de las fuentes de energía renovable da como resultado una reducción de la inercia del sistema y una menor capacidad para contener la frecuencia tras perturbaciones; lo que hace que el sistema sea más vulnerable a fallas de este tipo. Es decir, que la creciente inserción de fuentes de energía renovable tiene un gran impacto en la operación de los sistemas eléctricos y además en la evaluación de riesgos en cascada.

Como solución para mantener la estabilidad de la frecuencia Dai, Preece y Panteli (2022) proponen la utilización de sistemas de respuesta de frecuencia rápida (FFR) que proporcione soporte a la frecuencia suplementaria complementando el control de frecuencia primaria. Además, ven la importancia de considerar los servicios auxiliares asociados con la regulación de frecuencia al realizar un análisis de fallas en cascada en redes que contengan bastantes fuentes de energía renovable con la finalidad de mejorar la respuesta de frecuencia en la operación. Guatemala es un país que cuenta con una diversidad de fuentes de generación, por lo que es importante realizar un análisis de la

estabilidad del sistema ante contingencias por baja frecuencia para tomar mejores decisiones en los diseños de los planes de expansión, que incluyan estos tipos de estudios para el futuro del país.

En la publicación de Carrington, Ma, Dobson y Wang (2020) cuantifican la resiliencia de un sistema de distribución en base al desempeño histórico, a través de la extracción de curvas de resiliencia asociadas a la duración de las fallas, la tasa de recuperación promedio y la cantidad de componentes fallados de forma simultánea. Con base a estos datos se examinan las estadísticas de resiliencia para eventos pequeños, medianos y de gran magnitud con la finalidad de predecir y delimitar futuros eventos de fallas hasta con un 95 % de confiabilidad.

Para el análisis de este estudio se utilizarán los datos del posdespacho publicados por el AMM y las cargas que fueron desconectadas por cada distribuidora, con la finalidad de la extracción de curvas de resiliencia asociada a cada uno de los eventos, determinando el impacto económico que se generó y las acciones que se realizaron para minimizar los impactos.

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

En un sistema eléctrico de potencia existen parámetros que determinan las condiciones adecuadas para un correcto funcionamiento, en condiciones normales el sistema opera según la planificación de la operación; ante una contingencia que afecte la estabilidad del sistema eléctrico actuarán diferentes sistemas de protección automática para preservar la seguridad del SNI. Para esto se programa la coordinación de los elementos de protección de tal manera que los puntos de actuación sean menos críticos en cuestiones de pérdidas de carga o pérdidas de generación que se representan en dinero.

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

El 18 de mayo del 2022 a las 18:46 horas, según el informe sobre evento en el sistema regional publicado por el AMM, ocurrió una falla en el sistema eléctrico regional (SER) que dio lugar a la desconexión de la interconexión con México y pérdidas en las importaciones, esta desconexión provocó a su vez un desbalance entre generación y demanda del SER, que derivó en una baja en la frecuencia que activó los esquemas de protección que separa las áreas de control con los sistemas regionales.

Estos eventos en conjunto provocaron la actuación de los esquemas de la 4ª etapa de protección del sistema eléctrico de Guatemala, en la que se desconectaron 389 MW de carga de 1850 MW que se estaban despachando. Dentro de las maniobras realizadas para el restablecimiento del SNI se recurrió a la generación de reserva rápida (RRa) y se sincronizó con México para continuar con las importaciones programadas, restableciendo la demanda de las

distribuidoras a las 19:23 horas. Derivado de este evento, resalta la vulnerabilidad del sistema nacional interconectado por contingencias o perturbaciones que ocasionan desconexiones automáticas de carga con ocurrencia en el MER.

En este sentido, el presente estudio busca analizar la seguridad y confiabilidad del sistema ante los eventos que tienen baja probabilidad de ocurrencia pero que causan altos impactos en el mismo, mediante las estadísticas de las curvas de resiliencia.

### **3.2. Descripción del problema**

Ante la vulnerabilidad climática en Centroamérica y el caribe, la modificación de los patrones hidrológicos provocan mayores números de sequías e intensas lluvias asociadas a tormentas tropicales, huracanes, ciclones y el fenómeno de temperaturas oceánicas fluctuantes en el pacífico ecuatorial (El niño-Oscilación Sur).

La importancia de mantener el suministro de energía eléctrica ante condiciones anormales en el país, además del crecimiento del mercado eléctrico de forma competitiva a nivel regional, tomando en cuenta el desarrollo económico de Guatemala, hacen que la operación del sistema eléctrico nacional sea más compleja minimizando los tiempos de interrupción a un menor costo, por lo que conocer el comportamiento del mismo antes, durante y después de una contingencia tal que afecte la operativa es importante para la toma de decisiones de una manera óptima.

Partiendo de lo anterior se pretende analizar la resiliencia del mercado eléctrico de Guatemala, derivado de una contingencia que conlleve a una desconexión automática de carga, desde una perspectiva operativa con la

finalidad de proponer mejoras o analizar si el esquema actual se adapta a las necesidades del mercado eléctrico nacional.

### **3.3. Formulación del problema**

A continuación, se presentan las principales problemáticas que generaron la necesidad de realizar este estudio.

- **Pregunta central**

¿Se pueden minimizar los tiempos de recuperación del SNI ante una desconexión automática de carga por baja frecuencia a través del análisis estadístico de curvas de resiliencia?

- **Preguntas auxiliares**

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuántos eventos de desconexión automática de carga por baja frecuencia ocurrieron en el periodo del 2021 al 2022?
- ¿Cuál es la cantidad de carga afectada y los tiempos de duración de un evento de desconexión automática de carga por baja frecuencia?
- ¿Cómo se relacionan las operaciones con el tiempo de recuperación del SNI para regular la frecuencia durante un evento de desconexión automática de carga por baja frecuencia?

- ¿Cuál es el área resiliente trapezoidal del SNI ante un evento de desconexión automática de carga por baja frecuencia?

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

A continuación, se presenta la delimitación contextual, geográfica e histórica del problema de investigación.

- Delimitación contextual

Actualmente el sector energético se encuentra ante cambios significativos derivados de los efectos del cambio climático, por lo tanto se ven expuestos y vulnerables ante contingencias y perturbaciones que afecte el suministro de energía. Las exigencias de mantener un servicio continuo conllevan a implementar nuevas tecnologías y modelos de negocio para establecer un sistema eléctrico de potencia variable y flexible.

“En la práctica, no es realista garantizar que el suministro eléctrico nunca será interrumpido. La infraestructura siempre podrá ser más resistente, pero habrá un costo” (World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2014, p. .50). lo anterior hace referencia a la necesidad de replantearse si los sistemas actuales son lo suficientemente resilientes tal que garanticen que, ante una contingencia o una eventualidad, el tiempo de recuperación y las pérdidas económicas sean mínimas.

El análisis de la resiliencia del SNI se contextualiza en las contingencias que conlleven a la desconexión automática de carga por baja frecuencia que han ocurrido en los últimos años en Guatemala, los que son necesarios ser

estudiados en los que se involucran diferentes variables: tiempo, potencia, energía y las transacciones regionales.

- Delimitación geográfica

Para el estudio se utilizarán datos del AMM por lo que la delimitación geográfica se estableció en Guatemala y el efecto que se produce en las transacciones regionales.

- Delimitación Histórica

En los últimos años ha ganado importancia la preocupación por la calidad de la energía eléctrica, ante los efectos de los cambios climáticos en Guatemala no hay estudios que determinen la resiliencia del SNI por contingencias que interrumpan el suministro de energía eléctrica, por lo que a decisión del investigador se utilizó un muestreo por conveniencia para la delimitación histórica tomando como base los informes por desconexión automática de carga del esquema de baja frecuencia de Guatemala en el periodo del año 2021 al 2022.





## 4. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se enfoca en las líneas de investigación de la estructura y dinámica del mercado eléctrico y sus impactos en la economía nacional y global, además se asocia a la ingeniería de la confiabilidad y riesgo. Con este estudio se pretende incentivar las líneas de investigación asociadas a la resiliencia como parte del mejoramiento en la calidad del servicio eléctrico y la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia de Guatemala.

En este trabajo se obtendrán las curvas de resiliencia del sistema eléctrico nacional de Guatemala considerando el posdespacho, la duración de las fallas, el tiempo promedio de la recuperación y la cantidad de carga desconectada simultáneamente de las distribuidoras, para determinar la vulnerabilidad del sistema examinando las estadísticas de resiliencia de las desconexiones de carga por baja frecuencia.

El tema de investigación pretende beneficiar a futuras investigaciones asociadas al mejoramiento de la calidad del servicio, propuestas de mejoramiento en la operación del mercado eléctrico nacional, agentes del sector eléctrico y población general del país. También beneficiará a la operación del SNI, a través de las propuestas de mejora, para la reducción del tiempo de falla y la optimización de los recursos.

En Guatemala no se ha realizado un análisis de este tipo para cuantificar la vulnerabilidad del sistema a través de las curvas de resiliencia. Por tanto, esta investigación es relevante para el mejoramiento en la calidad del servicio.



## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Proponer acciones preventivas y de mitigación para minimizar los tiempos de respuesta de la recuperación del sistema nacional interconectado de Guatemala ante una desconexión automática de carga por baja frecuencia, a través de la obtención de las curvas de resiliencia operacional.

### **5.2. Específicos**

- Identificar los eventos de desconexión automática de carga por baja frecuencia en el periodo del 2021 al 2022 recopilando información de acceso público.
- Determinar la cantidad de carga afectada y el tiempo de ocurrencia de los eventos de una desconexión automática de carga por baja frecuencia.
- Relacionar el tiempo de recuperación con las operaciones implementadas durante un evento de desconexión automática de carga.
- Estimar el área resiliente trapezoidal, que indica la cantidad de degradación de la resiliencia en las fases y su evolución en el tiempo desde el nivel pre-perturbación hasta el nivel restaurativo.



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

El presente estudio analizará la resiliencia del sistema nacional eléctrico de Guatemala ante una desconexión automática de carga por baja frecuencia. Mediante esta investigación se podrá analizar el comportamiento del SNI para concluir si se pueden, proponer mejoras en los esquemas de operación actual para preservar la seguridad de este, cómo se ven relacionadas las operaciones publicadas en los informes del posdespacho respecto a los tiempos de duración de los eventos y si se pueden considerar la inclusión de nuevas tecnologías para tener un sistema más robusto capaz de reponerse ante eventos de baja frecuencia.

A nivel internacional el análisis de la resiliencia en sistemas eléctricos es un tema relativamente nuevo, por lo que aún no existen definiciones estandarizadas, además en Guatemala no se han aplicado investigaciones de este tipo.

De la mejora continua en los sistemas eléctricos de potencia, así como de mantener el suministro de energía eléctrica ante contingencias, surge la necesidad de realizar estudios de resiliencia en la red. Las contingencias que dan lugar a la desconexión de carga automática por baja frecuencia son causadas por el desbalance entre generación y carga. En esta investigación se verán los efectos de una contingencia, así como las curvas de resiliencia asociadas antes, durante y después de un evento en el SNI.

Este trabajo aportará información necesaria para investigaciones futuras que busquen medir los niveles de resiliencia del sistema nacional interconectado,

evaluando factores operativos y técnicos para la mejora en la calidad y continuidad del suministro eléctrico.

Al determinar lo anterior, se estará proponiendo una metodología nueva en el país, que podría servir en la mejora de los reportes y publicaciones presentadas a los guatemaltecos, además evaluar el efecto de las contingencias en la red para que en futuros eventos se mejoren los esquemas de actuación y protección de la red.

En cuanto a herramientas se utilizarán software de análisis de datos como lo son Microsoft Power BI Desktop y Excel, con lo que se pretende realizar los cuadros de indicadores de resiliencia, los datos serán obtenidos de información de acceso público del AMM, CNEE, CRIE y de ser necesario EOR.

## **7. MARCO TEÓRICO**

En eventos de baja probabilidad, pero alto impacto como lo son las desconexiones automáticas de carga por baja frecuencia, son necesarios definir algunos conceptos para comprender la aplicación de la resiliencia y como el estudio de esta influye en el sistema eléctrico de Guatemala. Este concepto servirá para comprender como a nivel global el estudio de la resiliencia busca incrementar la estabilidad de los sistemas energéticos y las exigencias de calidad, además será de utilidad para presentar los resultados esperados, las conclusiones y recomendaciones, para el investigador, los lectores y los interesados en asegurar la calidad del servicio en Guatemala.

### **7.1. Teoría de la resiliencia**

La teoría de la resiliencia hace referencia al comportamiento de los sistemas antes, durante y después de una perturbación, inicialmente este concepto se centraba en el comportamiento de sistemas ecológicos según Bernhard-Johannes et al. (2019). En la comprensión moderna el término de resiliencia se incluyó en aspectos sociales de un sistema, la ciencia de los materiales y en las redes informáticas, sin embargo, como consecuencias de los cambios climáticos el concepto se amplió a sistemas energéticos.

La resiliencia en sistemas eléctricos busca ser explicada a través de diferentes teorías y metodologías por lo cual no existe una definición única. Para tomar una conceptualización de la resiliencia Bösch et al. (2017) clasifica el tema en cuatro modelos diferentes para dar una explicación porque los conceptos y las teorías difieren entre sí, descubrieron que la aplicación de la resiliencia se



puede utilizar para categorizar diferentes aplicaciones. Algunas de las teorías exponen la resiliencia como un concepto o como una cantidad medible, Böschén et al. (2017) demuestra que no existe una aplicación unívoca de esta teoría es decir que algunos investigadores utilizan la resiliencia como un concepto cualitativo mientras que otros lo hace de forma cuantitativa; en esta investigación se analizará la resiliencia desde una perspectiva medible del sistema eléctrico de Guatemala.

### **7.1.1. Modelos teóricos de la resiliencia**

Para el análisis teórico de los modelos de la resiliencia Böschén et al. (2017) los clasifica en: modelo de estabilidad, modelo de interferencia, modelo de transformación y modelo de expansión.

#### **7.1.1.1. Modelo de estabilidad**

Este modelo se enfoca en la preservación y la estabilidad de los sistemas, en las que se analizan las amenazas potenciales en las condiciones del funcionamiento de estos.

Este estudio de investigación se enfoca en el modelo de estabilidad ya que se pretende analizar la estabilidad del SNI de Guatemala ante una contingencia que conlleve a la desconexión automática de carga por baja frecuencia, que es una amenaza potencial en la condición del funcionamiento de este, con la finalidad de proponer mejoras en el mismo para minimizar los impactos que estos generan en la red.

#### **7.1.1.2. Modelo de interferencia**

En este modelo analiza la interferencia externa con los sistemas y centra la comprensión en la estructura en cuestión de mantenerse funcional en relación con su entorno.

#### **7.1.1.3. Modelo de transformación**

Este modelo investiga la resistencia del sistema ante las transformaciones de su entorno a través de procesos.

#### **7.1.1.4. Modelo de expansión**

El modelo de expansión se enfoca en la reacción del sistema a través de los cambios de este. Es decir que no presta atención en el entorno si no en los cambios del propio sistema.

### **7.2. Resiliencia en sistemas eléctricos**

A continuación se muestra la definición y tipos de resiliencia en sistemas eléctricos de potencia.

#### **7.2.1. Definición**

Según Vugrin, Castillo y Silva-Monroy (2017) definen la resiliencia en sistemas de potencia como la capacidad de continuar operando y suministrando energía, aunque hayan ocurrido interrupciones con baja probabilidad de ocurrencia, pero con altas consecuencias tales como huracanes, terremotos y ataques cibernéticos. En la publicación seguridad y resiliencia de la

infraestructura crítica de la directiva de política presidencial en el 2013 citada por Xu, et al. (2016) el objetivo de estudiar la resiliencia en sistemas eléctricos es manejar de forma ideal la red tal que las consecuencias potenciales sean mínimas, así como la mejora en la recuperación, las medidas de preparación para futuros eventos y los análisis de gestión para desarrollar redes más robustas.

Las exigencias actuales de la calidad del servicio han llevado a que diferentes sectores incrementen los esfuerzos por desarrollar sistemas eléctricos capaces de mantenerse en función ante perturbaciones, es decir sistemas energéticos sostenibles.

## **7.2.2. Tipos de resiliencia en sistemas eléctricos**

Como se mencionó al principio de este capítulo, los temas de resiliencia son relativamente nuevos, sin embargo, según Paredes, Serrano y Molina (2020) existen dos tipos de resiliencia para sistemas eléctricos:

### **7.2.2.1. Resiliencia operacional**

Este tipo de resiliencia se enfoca en las operaciones previas, durante y después de un evento o contingencia relevante que se realizaron con la finalidad de reducir la potencia afectada o bien el tiempo de reconexión de las instalaciones afectadas. Esta investigación se enfoca en el análisis de la resiliencia operacional del SNI de Guatemala.

### **7.2.2.2. Resiliencia de infraestructura**

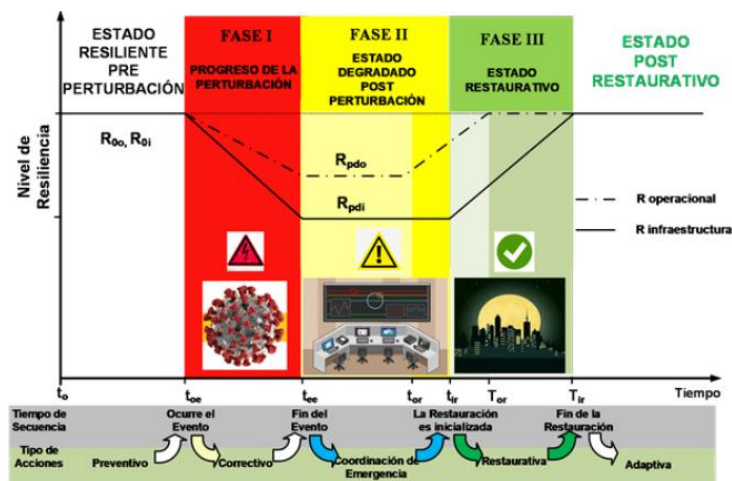
Este tipo de resiliencia abarca la resistencia física de un sistema eléctrico tal que al verse afectado sus elementos constructivos por daños, averías o

colapsos existe la garantía de aislar parte del sistema para que no se afecte la continuidad del servicio eléctrico.

### 7.2.3. Métricas de resiliencia

Las métricas de la resiliencia están asociadas a diferentes estudios que permiten evaluar el desempeño y la respuesta de la red durante las diferentes fases de un evento. Algunos de estos estudios incluyen la medición de la resiliencia como una diferencia entre la capacidad del sistema en pleno funcionamiento y su capacidad después de ocurrir un evento, también se pueden incluir la relación del área entre curvas del rendimiento real y el planificado, además de la proporción recuperada desde un estado interrumpido. En la mayoría de estos estudios se modelan a través del llamado triángulo de resiliencia representado en la figura 1.

Figura 1. Comportamiento de la resiliencia de un sistema eléctrico, curva trapezoidal con un evento perturbador



Fuente: Paredes et Al (2020) *Revista Colegio de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos de Pichincha*.

En la figura 1. se cuantifican los niveles de la resiliencia de un sistema de potencia eléctrico a través de indicadores, durante la ocurrencia de una contingencia y su comportamiento en función del tiempo. Además se muestran cómo se cuantifican los niveles de la resiliencia operacional y de infraestructura que no necesariamente son iguales. Es importante mencionar las tres fases de la curva trapezoidal las cuales son:

- Fase I: en esta fase el sistema se encuentra en el proceso de la perturbación, de aquí se puede saber el tiempo que transcurre la falla como la diferencia entre el tiempo inicial y el tiempo final de la falla. A partir de esta fase los niveles de resiliencia se reducen desde un nivel previo de la perturbación hasta un nivel post perturbación.
- Fase II: en esta fase el sistema se encuentra en estado degradado un momento después de ocurrida la falla, durante esta fase se puede obtener el tiempo de degradación del sistema como la diferencia entre el tiempo después de la contingencia y el tiempo antes de iniciar el proceso de restauración, los niveles se mantienen en un estado post perturbación.
- Fase III: en esta fase el sistema se encuentra restaurando tanto para la resiliencia operacional como la de infraestructura. A partir de esta fase se pueden concluir algunos objetivos de esta investigación como identificar si la relación de las operaciones implementadas para restaurar el sistema influye con el tiempo sin servicio para cada una de las contingencias que se estarán analizando.

A continuación, se muestran las métricas  $\Phi$ ,  $\Lambda$ ,  $E$  y  $\Pi$  abordadas por Paredes et Al. (2020) las cuales se definen como:

$$\Phi = \frac{R_{pdo} - R_{0o}}{t_{ee} - t_{oe}} \quad (1)$$

En donde:

- $\Phi$  : Pendiente de degradación
- $R_{pdo}$  : Resiliencia post perturbación
- $R_{0o}$  : Resiliencia previa a la perturbación
- $t_{ee}$  : Tiempo final del evento
- $t_{oe}$  : Tiempo inicial del evento

$$\Lambda = R_{pdo} - R_{0o} \quad (2)$$

En donde:

- $\Lambda$  : Degradación del nivel de resiliencia
- $R_{pdo}$  : Resiliencia post perturbación
- $R_{0o}$  : Resiliencia previa a la perturbación

$$E = t_{or} - t_{ee} \quad (3)$$

En donde:

- $E$  : Tiempo en el que sistema permanece degradado
- $t_{or}$  : Tiempo previo a la restauración del sistema
- $t_{ee}$  : Tiempo final del evento

$$\Pi = \frac{R_{0o} - R_{pdo}}{T_{or} - t_{or}} \quad (4)$$

En donde:

- $\Pi$  : Pendiente de restauración
- $R_{pdo}$  : Resiliencia post perturbación
- $R_{0o}$ : Resiliencia previa a la perturbación
- $T_{or}$  : Tiempo final de la restauración
- $t_{or}$  : Tiempo previo a la restauración del sistema

Por último, se considera el cálculo de la media del área trapezoidal de la resiliencia operacional como:

$$A_{rt} = \int_{t_{oe}}^{T_{or}} R_{op}(t) dt \quad (5)$$

En donde:

- $A_{rt}$  : Área trapezoidal de la resiliencia
- $T_{or}$  : Tiempo final de la restauración
- $t_{oe}$  : Tiempo inicial del evento
- $R_{op}$  : Resiliencia operacional

Además, Villamarín et al. (2021) considera la métrica L como parte del análisis de la degradación de la resiliencia en el instante de ocurrencia de un evento, el enfoque del trabajo de Villamarín et al. es el análisis del impacto de eventos de corta duración en los sistemas de transmisión como lo son los terremotos, por lo cual considera los indicadores (GEGC) que indica la capacidad de generación y el indicador (DCE) que analiza la demanda de carga dentro de la resiliencia operacional.

$$GEGC = \frac{\sum_{s \in SC} \sum_{i \in I} G_{i,s}}{NS} \quad (6)$$

En donde:

- GEGC: Cantidad de capacidad de generación
- $G_{i,s}$ : Capacidad disponible de la central de generación  $i$  por escenario de contingencia
- NS: Número de escenarios de contingencias

$$DCE = \frac{\sum_{s \in SC} \sum_{n \in N} D_{n,s}}{NS} \quad (7)$$

En donde:

- DCE: Demanda de la carga
- $D_{n,s}$ : Demanda conectada en  $n$  por escenario de contingencia
- NS: Número de escenarios de contingencias

#### 7.2.4. Acciones de resiliencia

Para poder mejorar la resiliencia en sistemas eléctricos según Umunnakwe, A. et al. (2021), se deben integrar acciones preventivas, correctivas y restaurativas en la operación de estos, a través de redes inteligentes, como técnicas avanzadas de telecomunicaciones y de control que permitirán aumentar la flexibilidad operativa, además es necesario considerar los recursos de generación distribuida renovable y el almacenamiento de energía como acciones restauradoras.



Por otra parte, se considera la reconfiguración de la red para ayudar en la recuperación y el reforzamiento del sistema además de considerar eventos disruptivos como parte de la planificación de la operación.

### **7.3. Contingencias del SNI**

A continuación, se muestra la definición y tipos de contingencias del SNI.

#### **7.3.1. Definiciones**

Una contingencia es una serie de cambios imprevistos en el funcionamiento normal de un sistema eléctrico, en estas uno o más componentes fallan o se desconectan; en condiciones normales el sistema opera cumpliendo con los requerimientos definidos dentro de las normativas técnicas.

#### **7.3.2. Tipos de contingencias**

Los Términos estándar para informar y analizar incidentes de cortes y estados de cortes de electricidad publicados en IEEE citados por Cruz (2018) se definen los siguientes tipos de contingencias:

- Contingencia múltiple relacionada: para este tipo de contingencia la interrupción en la operación se da por múltiples eventos que son consecuencia uno del otro, estos son iniciados por un único evento o más. La ocurrencia de las interrupciones de forma individual en una contingencia múltiple relacionada se clasifica como primarias o secundarias dependiendo de la relación que estas tengan durante el evento y el incidente que las causó.

- Contingencia múltiple independiente: en esta cada interrupción es causada por distintos incidentes iniciales en “donde la ocurrencia de cada interrupción no es consecuencia de otra interrupción, pero las salidas de operación se superponen” (Cruz, 2018, p.12).

### **7.3.3. Riesgos de ocurrencia de contingencias**

Para Cruz (2018) dentro de las consideraciones para los modelos de planificación de los sistemas de transmisión se toma en cuenta la seguridad probabilística como un cálculo de la ocurrencia de contingencias. Hoy en día la metodología para medir el riesgo de la ocurrencia de una contingencia es la teoría de la probabilidad estos análisis han cambiado de asumir las fallas en sistemas eléctricos como independientes a fallas que son por causas comunes o dependientes.

## **7.4. Estabilidad y regulación de frecuencia**

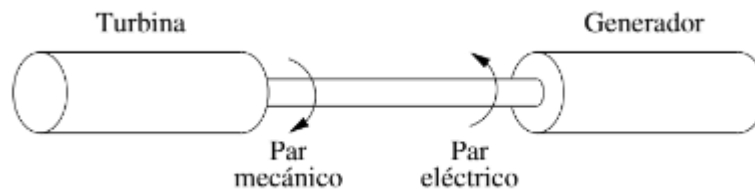
Los sistemas eléctricos de potencia están constituidos por diferentes equipos conectados entre sí, con diferentes características y comportamientos, según Cruz (2018) esto hace que el proceso de estabilidad sea compleja y variable por lo que es importante analizar a detalle la operativa del sistema y las formas de los disturbios dependiendo del diseño de la red.

### **7.4.1. Estabilidad angular**

La estabilidad angular según Cruz (2018) es la capacidad de las máquinas síncronas de un sistema interconectado tal que se mantenga el sincronismo después de un evento, en funcionamiento normal el equilibrio del torque

mecánico y el torque eléctrico de los generadores es estable, es decir que la velocidad es constante, pero si el sistema se ve alterado el resultado es una aceleración o desaceleración en el rotor de la máquina. Si se acelera de forma temporal un generador, su posición angular cambiaría en comparación de las otras máquinas conectadas a la red, esto resulta en una inestabilidad del sistema incapaz de absorber la energía cinética de las diferentes velocidades.

Figura 2. **Torque aplicado en el eje de un generador**



Fuente: Ledesma. (2020). *Análisis dinámico y control de sistemas eléctricos*.

Para Cruz (2018) principalmente la estabilidad angular del sistema eléctrico está dividida en dos: la estabilidad ante pequeños disturbios y la estabilidad ante grandes disturbios.

#### **7.4.1.1. Estabilidad ante pequeños disturbios**

Ante estos pequeños disturbios el sistema debe tener la capacidad de mantener el sincronismo es fundamental considerar que “el rango del tiempo de interés para el estudio de este tipo de estabilidad angular es de los 10 a los 20 segundos después de ocurrido un disturbio” (Cruz, 2018, p.29), teniendo en cuenta esta consideración la inestabilidad del sistema se presenta en:

- Una deficiencia en el torque de sincronismo que incrementa el ángulo del rotor de manera no periódica, esto asociado a la conversión de energía electromecánica.
- Al no tener un torque amortiguador asociado a la disipación de energía se generan oscilaciones en aumento del ángulo del rotor.

#### 7.4.1.2. Estabilidad ante grandes disturbios

Para este tipo de disturbios el sistema el sistema tiene que ser capaz de mantener el sincronismo ante eventos transitorios “tal como un cortocircuito en una línea de transmisión” (Cruz, 2018, p.30), por lo que se considera la estabilidad del sistema antes de una falla así mismo el impacto que estos generan en la red “el tiempo de interés es generalmente de 3 a 5 segundos después del disturbio” (Cruz, 2018, p.30).

#### 7.4.2. Estabilidad de frecuencia

Para Villalba (2021) la estabilidad de la frecuencia se relaciona con el balance de la potencia activa en cada nodo del sistema, para ello la potencia que se genera debe ser igual a la demanda de las cargas incluyendo las pérdidas. Para describir la estabilidad de la frecuencia Villalba parte de la ecuación de la dinámica de una máquina síncrona:

$$P_m - P_e - K_d \cdot \frac{d\delta}{dt} = 2 \cdot H \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (8)$$

En donde:

- $P_m$ : Potencia mecánica

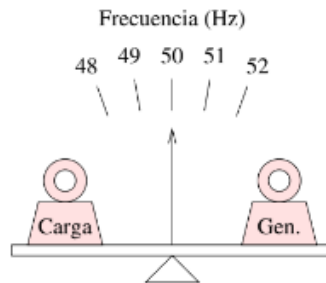
- $P_e$ : Potencia electromagnética
- $K_d$ : Factor de amortiguación
- $\delta$ : Ángulo de carga
- $H$ : Constante de inercia

De lo anterior según Villalba (2021) se observa que la velocidad de rotación de los generadores síncronos y por ende la frecuencia de la red, es directamente proporcional al desequilibrio instantáneo entre generación y la demanda e inversamente proporcional a la suma de las inercias que proporciona cada grupo de generadores, es por ello que de manera global el control de frecuencia se convierte en un problema ya que las plantas de generación no solo tienen que aportar los requerimientos para el control de frecuencia también cumplir con la programación para el funcionamiento del mercado.

#### **7.4.3. Límites de frecuencia**

Para un correcto funcionamiento del sistema que asegure la calidad de la energía según Ledesma (2020), la frecuencia de referencia es de 50 Hz para Europa además de algunas partes del Sur de América y la mayoría de Asia y Oceanía, en la gran mayoría de América y parte de Japón la frecuencia nominal es de 60 Hz. Esta selección es de bases históricas. Para Guatemala la CNEE a través de las Normas de coordinación operativa define los límites de frecuencia para condiciones normales entre 59.9 Hz y 60.1 Hz y en un estado de emergencia entre 59.8 Hz y 60.2 Hz. Ledesma considera la frecuencia como un parámetro que garantiza la calidad de energía en un sistema eléctrico.

Figura 3. **Relación entre frecuencia, carga y generación**



Fuente: Ledesma. (2020). *Análisis dinámico y control de sistemas eléctricos*.

#### 7.4.4. **Modelado de carga del sistema eléctrico**

Para Aguas (2020) un modelo se define por medio de una expresión matemática de un sistema o fenómeno. Los modelos de carga se representan de forma matemática con la relación entre el voltaje, frecuencia y la potencia activa y reactiva de las cargas, Para analizar estos modelos deben considerar el mayor número de cargas existentes además de tener en cuenta en todo momento el funcionamiento real del sistema en todo el tiempo.

##### 7.4.4.1. **Modelo del generador síncrono**

Para analizar el modelo del generador síncrono Ledesma (2020) analiza el giro del eje del rotor sometido por el torque mecánico desde la turbina y el torque eléctrico desde la carga.

$$J \frac{d^2\delta}{dt^2} = (T_m - T_e) \quad (9)$$

En donde:

- J: momento de inercia

- $\delta$ : ángulo del rotor
- $T_m$ : torque mecánico
- $T_e$ : torque eléctrico

#### **7.4.5. Regulación de frecuencia**

Para que la calidad del servicio de un suministro eléctrico sea aceptable la frecuencia debe permanecer dentro de los límites establecidos, las variaciones en esta provocan un mal funcionamiento en los equipos domésticos e industriales. En caso exista una perturbación en el sistema tal que altere el equilibrio de la frecuencia, se siguen procedimientos para regular y controlar el sistema hasta que vuelva a un estado normal de operación dentro de los límites establecidos. Para conseguir regular el sistema existen algunos procedimientos principales que se listan a continuación:

##### **7.4.5.1. Regulación primaria**

Los objetivos de este tipo de regulación es equilibrar de forma automática la demanda y generación en un sistema eléctrico definido en el primer lazo de control, esto se consigue a través de variar de forma autónoma la potencia en los generadores, gracias a la actuación inmediata de los reguladores de velocidad.

##### **7.4.5.2. Regulación secundaria**

Cuando existe una variación de carga se consigue el balance de la demanda y generación a través de la regulación primaria, sin embargo, hay efectos que no logra resolver, el desvío de la frecuencia respecto a la referencia y el reparto de carga entre generadores del sistema; de forma general la programación de los flujos de potencia del área de control no se cumplirá,

Ledesma (2020). Para esto se implementa la regulación secundaria que tiene como objetivo corregir los efectos anteriores, regresando la frecuencia a su referencia y recuperando la programación de los flujos de potencia esto a través de un control de generación automático.

#### **7.4.5.3. Reducción de voltaje**

Si no se cuenta con generación suficiente, para lograr controlar la estabilidad de un sistema de potencia ante una contingencia, se recurre a una reducción de los niveles de tensión hasta valores confiables para no provocar un colapso del sistema o mediante estudios que consideren los niveles mínimos de tensión.

#### **7.4.5.4. Reducción de carga**

Las reducciones de carga o deslastre de carga es requerido por el operador del sistema a las empresas distribuidoras, si en una emergencia la frecuencia disminuye y no existe generación suficiente para compensar a los valores nominales.

#### **7.4.5.5. Desconexión automática por baja frecuencia**

Durante una contingencia puede haber una caída repentina de la frecuencia que en donde la regulación primaria no es suficiente, esto podría ocurrir durante una pérdida de generación importante o una línea de transmisión con gran cantidad de potencia, Para evitar que exista un apagón generalizado se coordinan los sistemas de protección de modo que realicen una desconexión automática de carga o deslastre automático. En esta coordinación automática se



asegura que las cargas esenciales continúan con energía como centros hospitalarios, comisarías, estaciones de bomberos, torres de control de aeropuertos, estaciones de radio y televisión.

#### **7.4.6. Tipos de respuesta ante la desviación de frecuencia**

En general los sistemas de potencia eléctricos pueden tener algunas respuestas ante contingencias tales como:

- Respuestas eléctricas.
- Respuestas inerciales.
- Respuestas en los gobernadores durante la regulación primaria.
- Respuestas en los controladores secundarios durante la regulación secundaria.
- Respuestas del operador

Para Ledesma (2020) los sistemas de potencia responden a la variación de frecuencia según la demanda de carga; en algunos casos la demanda de potencia no es dependiente de la frecuencia esto aplica para cargas resistivas, en otros tipos de cargas al aumentar la demanda también habrá un incremento en la frecuencia, esta relación se puede expresar como:

$$\Delta P_e = \Delta P_i + D\Delta\omega \quad (10)$$

En donde:

- $\Delta P_e$ : relación entre el incremento de demanda total
- $\Delta P_i$ : incremento de potencia independiente de la frecuencia

- D: constante de la relación entre la variación de frecuencia y el incremento de potencia.
- $\Delta\omega$ : velocidad angular

“La dependencia de la carga con la frecuencia actúa como un mecanismo de amortiguamiento” (Ledezma, 2020, p.63). Es por ello que la estabilidad del sistema y los cambios en la frecuencia son consecuencia de la demanda.

#### **7.4.7. Despacho de generación**

Durante algunas condiciones operativas se pueden presentar problemas asociados a la confiabilidad en las programaciones operativas asociadas al tipo de comportamiento en la demanda, la topología del sistema y el resultado de la asignación del despacho de las centrales de generación. Por ello es necesario analizar y definir algunos requerimientos del despacho fuera de la lista de mérito para mantener los niveles de confiabilidad. Algunos de estos requerimientos son justificados por estudios eléctricos correspondientes para cubrir necesidades de soporte de tensión, apoyo en la estabilidad del sistema y algunas gestiones en la transmisión.

#### **7.5. Esquemas de protección**

Derivado del crecimiento de la demanda en sistemas eléctricos, son necesarios instalar esquemas de protección tal que durante la operación se garantice la integridad de la red ante eventos de forma de optimizar la transmisión, reducir costos de producción y minimizar el número de usuarios afectados en estados de emergencia.

### **7.5.1. Definición**

Las protecciones en un sistema permiten la conexión o desconexión de uno o varios componentes del sistema, también son conocidos como esquemas de acción remedial y tienen como objetivo controlar los sistemas operando en condiciones anormales. Estos se instalan derivados de estudios por condiciones inusuales del sistema tales como sobrecargas, inestabilidad angular, inestabilidad de frecuencia o de voltaje tomando en cuenta acciones remediales como disparos en generadores, cortes de carga intencionales cambios automáticos en las topologías y así contrarrestar los efectos de una contingencia.

### **7.5.2. Clasificación de los esquemas de protección**

Según Cruz (2018) algunos de estos esquemas se clasifican en:

- Disparo automático de generación (DAG)
- Disparos automáticos de carga (DAC)
- Disparo automático de línea (DAL)
- Cambio automático de la topología por disparos de línea (CTL)
- Cambios automáticos de topología por disparo de transformadores (CTT)
- Disparos automáticos de interruptores (DAI)
- Cambios automáticos de topología por disparos en interruptores (CTI)
- Esquemas complementarios de desconexión o conexión automática de reactores (ECR)
- Esquemas de desconexión o conexión automática de capacitores (ECC)
- Separación controlada del sistema
- Disparos y recierres monopolares (DRM)
- Cortes de carga por relevadores de voltaje

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. Marco teórico
  - 1.1. Antecedentes de estudios de resiliencia en sistemas eléctricos
  - 1.2. Teoría de resiliencia
    - 1.2.1. Modelos teóricos de la resiliencia
      - 1.2.1.1. Modelo de estabilidad
      - 1.2.1.2. Modelo de interferencia
      - 1.2.1.3. Modelo de transformación
      - 1.2.1.4. Modelo de expansión
  - 1.3. Resiliencia en sistemas eléctricos de potencia
    - 1.3.1. Definición
    - 1.3.2. Tipos de resiliencia
      - 1.3.2.1. Resiliencia operativa
      - 1.3.2.2. Resiliencia de infraestructura
    - 1.3.3. Métricas de resiliencia

- 1.3.4. Acciones de resiliencia
  - 1.4. Contingencias del SNI
    - 1.4.1. Definiciones
    - 1.4.2. Tipos de contingencias
    - 1.4.3. Riesgos de ocurrencia de contingencias
  - 1.5. Estabilidad y regulación de frecuencia
    - 1.5.1. Estabilidad angular
      - 1.5.1.1. Estabilidad ante pequeños disturbios
      - 1.5.1.2. Estabilidad ante grandes disturbios
    - 1.5.2. Estabilidad de frecuencia
    - 1.5.3. Límites de frecuencia
    - 1.5.4. Modelado de carga del sistema eléctrico
      - 1.5.4.1. Modelo del generador síncrono
    - 1.5.5. Regulación de frecuencia
      - 1.5.5.1. Regulación primaria
      - 1.5.5.2. Regulación secundaria
      - 1.5.5.3. Reducción de voltaje
      - 1.5.5.4. Reducción de carga
      - 1.5.5.5. Desconexión automática por baja frecuencia
    - 1.5.6. Tipos de respuesta ante la desviación de frecuencia
    - 1.5.7. Despacho de generación
  - 1.6. Esquemas de protección
    - 1.6.1. Definición
    - 1.6.2. Clasificación de los esquemas de protección
2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
- 2.1. Recolección de informes para el análisis de datos
    - 2.1.1. Datos generales

2.1.2. Datos específicos

2.2. Análisis de las variables a estudiar

2.2.1. Comportamiento del despacho durante una desconexión automática de carga

2.2.2. análisis económicos del comportamiento de la generación

2.2.3. Desglose de indicadores de generación con Power BI

2.3. Desconexiones automáticas de carga

2.3.1. Análisis de la demanda versus generación durante un evento

2.4. Métodos analíticos para establecer curvas de resiliencia

2.4.1. Curvas de resiliencia del SNI

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS



## **9. METODOLOGÍA**

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

A continuación, se presentan las características de la metodología del estudio que contienen el diseño, el enfoque, el alcance y la unidad de análisis.

#### **9.1.1. Diseño**

El diseño de la presente investigación es del tipo no experimental, ya que se observan los eventos en un entorno natural, con el fin de analizar los datos, además no se posee control de las variables al ser hechos ya ocurridos, en este sentido no se puede manipular la información dentro de este estudio. La recolección de la información por analizar será en un periodo de tiempo por lo que el diseño también será transversal. Utilizando el modelo del triángulo de resiliencia para analizar las diferentes fases de la resiliencia, se pretende evaluar el desempeño actual y la respuesta de la red ante una contingencia que conlleve a una desconexión de carga por baja frecuencia, para proponer acciones preventivas que puedan minimizar el tiempo de recuperación del sistema y el impacto que estos ocasionan.

Este modelo evalúa la diferencia entre la capacidad actual del sistema en pleno funcionamiento y la capacidad después de ocurrida una falla, también considera la relación del área de las curvas del rendimiento real contra el rendimiento planificado y la proporción recuperada desde un estado interrumpido.



### **9.1.2. Enfoque**

El enfoque de la presente investigación es cuantitativo, ya que se recolectarán y analizarán los datos que se modelarán a través del triángulo de resiliencia operacional para visualizar el comportamiento de la red antes, durante y después de una contingencia en donde se requiera la desconexión automática de carga por baja frecuencia, se utilizará el modelo de estabilidad que se enfoca en la preservación y la estabilidad de los sistemas ante amenazas potenciales como esta.

En los últimos años el análisis de la resiliencia en eventos con baja probabilidad de ocurrencia pero que causan altos impactos en las redes eléctricas han sido temas de discusión en aras de mejorar el consumo eficiente de energía y las condiciones del acceso de la misma a nivel mundial, si bien es cierto, que en los últimos 25 años se ha logrado obtener una mayor robustez del sistema nacional interconectado de Guatemala todavía hay desafíos que proponen aumentar la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica que satisfagan las necesidades sociales del país además de las necesidades de producción, en base a esto se recolectarán los datos de la cantidad de carga afectada y el tiempo de las contingencias que desbalancean la carga y generación provocando una baja frecuencia.

### **9.1.3. Alcance**

El alcance del presente estudio de investigación es del tipo exploratorio ya que tiene como objetivo principal, proponer acciones preventivas y de mitigación para minimizar los tiempos de recuperación del sistema nacional interconectado de Guatemala ante una desconexión automática de carga por baja frecuencia a través de la medición de la resiliencia, dado que no se cuentan con estudios

previos del nivel de resiliencia en el país este tema tiene una perspectiva innovadora que ayudará a futuras investigaciones de resiliencia en el sistema eléctrico de Guatemala.

## 9.2. Unidad de análisis.

La población del estudio serán las contingencias por baja frecuencia en las que se reguló la frecuencia a través de una desconexión automática de carga en el SNI, analizando la pérdida de carga y el tiempo de duración de dichos eventos. La información será obtenida a través de los informes históricos publicados por el AMM y CNEE para identificar los eventos con ocurrencia en el SNI y el MER.

## 9.3. Variables

En la siguiente tabla se muestran las variables del estudio:

Tabla I. Descripción de las variables en estudio

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>
<b>Resiliencia [MW/h]</b>	Según Paredes et al. (2020) la resiliencia operacional se refiere a las operaciones previas, durante y después de un evento o contingencia relevante que se realizaron para reducir la potencia y el tiempo afectados.
<b>Regulación de frecuencia [Hz]</b>	Para evitar que exista un apagón generalizado se coordinan los sistemas de protección de modo que realicen una desconexión automática por baja frecuencia para regular la frecuencia del sistema.
<b>Cantidad de carga desconectada [MW]</b>	La cantidad de carga se refiere a la carga despachada por las distribuidoras.

Continuación tabla I.

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>
<b>Duración de contingencias [h]</b>	Se define como el tiempo que dura una falla, hasta el momento en que se normaliza el sistema.
<b>Despacho de Generación [MWh]</b>	En base a la norma de Coordinación Operativa No. 3 se consideran los servicios complementarios a fin de mantener la calidad del servicio.
<b>Contingencias</b>	Se definen como cambios imprevistos en el funcionamiento normal de un sistema eléctrico.

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Variabes e indicadores**

<b>Variable</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Resiliencia [MW/h]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradación</li> <li>• Desempeño</li> <li>• Triángulo de resiliencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respuesta del sistema ante una falla.</li> <li>• Adaptación del sistema después de una falla</li> <li>• Comportamiento del sistema durante una falla.</li> </ul>
<b>Regulación de frecuencia [Hz]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desconexiones automáticas de carga por baja frecuencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Métodos de protección para evitar apagones generalizados</li> </ul>
<b>Cantidad de carga desconectada [MW]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia</li> <li>• Demanda de potencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuantificación de la carga desconectada por las distribuidoras</li> </ul>
<b>Duración de contingencias [h]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Horarios de falla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuantificación del tiempo sin servicio de energía eléctrica</li> </ul>
<b>Despacho de Generación [MWh]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energía</li> <li>• Consumo de energía perdida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de los servicios complementarios para la regulación de frecuencia</li> </ul>

Continuación tabla II.

<b>Variable</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Contingencias</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Contingencias fuera del SNI de Guatemala.</li><li>• Contingencias con origen en el SNI.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Análisis del origen de las contingencias dentro o fuera del SNI</li></ul>

Fuente: elaboración propia.

#### **9.4. Fases del desarrollo de la investigación**

A continuación, se presenta las fases de estudio utilizadas para desarrollar la investigación:

##### **9.4.1. Fase I. Revisión documental**

Se realizará la consulta de diferentes fuentes de información relacionadas a temas de estadística de resiliencia en sistemas de potencia eléctrica, así mismo la aplicación de esta para la mejora en la seguridad y la calidad del servicio de energía eléctrica. Para el análisis de la resiliencia operacional del SNI de Guatemala es necesario recolectar la información de la carga desconectada por las distribuidoras, los tiempos de duración de los eventos y las pérdidas en generación durante las contingencias que dieron lugar a la desconexión automática de carga por baja frecuencia, con la información recopilada se podrá analizar el comportamiento del sistema antes, durante y después de estos eventos con la finalidad de proponer mejoras que ayuden a minimizar los tiempos de recuperación.

#### **9.4.2. Fase II. Recopilación de informes de desconexión automática de carga por baja frecuencia del 2021 al 2022**

Durante el desarrollo de esta fase se realizaron las siguientes acciones:

- Consultas de información de acceso público a la CNEE, de los informes estadísticos del mercado mayorista en el periodo del 2021 al 2022.
- Revisión de informes recientes de las desconexiones automáticas de carga publicados por el AMM en los resultados de la operación.
- Resultados del posdespacho en la que se publica la información de las operaciones realizadas en el SNI durante una contingencia.
- Las desconexiones automáticas de carga con origen en el SER publicados por el EOR en los informes diarios de la operación.

Con los datos obtenidos de las diferentes instituciones se podrán identificar la información de las desconexiones automáticas de carga por baja frecuencia en el periodo del 2021 al 2022, con las cuales se podrá desarrollar la base de datos que será útil para aplicar las estadísticas de resiliencia utilizando software de análisis de datos como Microsoft Excel y Power BI Desktop.

#### **9.4.3. Fase III. Análisis de datos para determinar el tiempo y la carga afectada de la ocurrencia de eventos**

Basado en las publicaciones de los informes de desconexiones automáticas de carga se utilizarán software de análisis de datos para poder determinar los tiempos de ocurrencia de falla y la cantidad de carga desconectada

automáticamente para estimar la pendiente de la degradación del nivel de resiliencia durante la ocurrencia del evento perturbador, además se evaluará el tiempo que el SNI permanece en el estado degradado post perturbación.

#### **9.4.4. Fase IV. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar la relación del tiempo de recuperación con las operaciones implementadas**

De los análisis previos de la pendiente de degradación del nivel de resiliencia de un estado antes y después de la falla, se evaluarán las publicaciones del posdespacho con la finalidad de identificar cuáles fueron los requerimientos necesarios para compensar el desbalance entre la generación-demanda y cuál es la relación de estas operaciones con el tiempo requerido para alcanzar este nivel de resiliencia.

#### **9.4.5. Fase V. Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para obtener el área resiliente trapezoidal como indicativo de la cantidad de degradación de la resiliencia en las fases y su evolución en el tiempo**

Con las curvas de resiliencia operacional se tiene el comportamiento de resiliencia del sistema eléctrico nacional interconectado, desde el punto pre-perturbación, post perturbación y el estado restaurativo, por lo que se graficará la curva en función del tiempo y la carga afectada con la finalidad de identificar el área resiliente trapezoidal con la cual se evaluará la cantidad de degradación de la resiliencia.

#### 9.4.6. Resultados esperados

Los resultados que se esperan de este estudio se plantean en base a los objetivos que tienen el propósito de proponer mejoras ante eventualidades en el sistema que se compensen a través de una desconexión automática de carga del esquema de baja frecuencia.

Tabla III. Resultados esperados

Preguntas de investigación	Objetivo	Fases	Resultados esperados
¿Se pueden minimizar los tiempos de recuperación del SNI ante una desconexión automática de carga por baja frecuencia a través del análisis estadístico de curvas de resiliencia?	Proponer acciones preventivas y de mitigación para minimizar los tiempos de respuesta de la recuperación del sistema nacional interconectado de Guatemala ante una desconexión automática de carga por baja frecuencia, a través de la obtención de las curvas de resiliencia operacional.	Revisión documental	Haber obtenido la resiliencia del SNI que permita proponer mejoras en la operación para reducir los tiempos de respuesta de la recuperación
¿Cuántos eventos de desconexión automática de carga por baja frecuencia ocurrieron en el periodo del 2021 al 2022?	Identificar los eventos de desconexión automática de carga por baja frecuencia en el periodo del 2021 al 2022 recopilando información de acceso público	Recopilación de informes de desconexión automática de carga por baja frecuencia del 2021 al 2022	Haber identificado los eventos de desconexión automática de carga por baja frecuencia en el periodo del 2021 al 2022
¿Cuál es la cantidad de carga afectada y los tiempos de duración de un evento de desconexión automática de carga por baja frecuencia?	Determinar la cantidad de carga afectada y el tiempo de ocurrencia de los eventos de una desconexión automática de carga por baja frecuencia.	Análisis de datos para determinar el tiempo y la carga afectada de la ocurrencia de eventos.	Haber determinado la carga afectada y los tiempos de ocurrencia de los eventos de desconexión automática de carga por baja frecuencia.

Continuación tabla III.

Preguntas de investigación	Objetivo	Fases	Resultados esperados
¿Como se relacionan las operaciones con el tiempo de recuperación del SNI para regular la frecuencia durante un evento de desconexión automática de carga por baja frecuencia?	Relacionar el tiempo de recuperación con las operaciones implementadas durante un evento de desconexión automática de carga.	Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para determinar la relación del tiempo de recuperación con las operaciones implementadas	Haber relacionado las operaciones implementadas con el tiempo de recuperación para ver si estas se pueden mejorar.
¿Cuál es el área resiliente trapezoidal del SNI ante un evento de desconexión automática de carga por baja frecuencia?	Obtener el área resiliente trapezoidal, que indica la cantidad de degradación de la resiliencia en las fases y su evolución en el tiempo desde el nivel pre-perturbación hasta el nivel restaurativo.	Análisis cuantitativo y estadística descriptiva para obtener el área resiliente trapezoidal como indicativo de la cantidad de degradación de la resiliencia en las fases y su evolución en el tiempo.	Haber obtenido el área resiliente trapezoidal, que será el indicativo para determinar la cantidad de degradación del sistema en las diferentes fases de afectación.

Fuente: elaboración propia.





## **10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

De la información recopilada previamente, las técnicas que se utilizarán para el análisis estadístico de la resiliencia en los sistemas de potencia eléctrico durante el desarrollo de esta investigación se muestran a continuación:

### **10.1. Análisis aritmético y algebraico**

Durante un evento perturbador, el análisis de resiliencia se debe considerar en diferentes fases (Umunakwe, A. et al. 2021). El proceso de perturbación analiza el tiempo final con el tiempo inicial de un evento, para ello se hace uso de operaciones aritméticas para encontrar el diferencial, además es necesario calcular la diferencia entre la demanda que se tenía antes de la falla y la demanda después de la falla, es decir la carga perdida durante un evento de desconexión automática de carga por baja frecuencia. Con esto se logra estimar la primera fase de transición que es la pendiente de degradación del sistema durante la ocurrencia de un evento.

La fase de interrupción se estima a partir de finalizado el evento y comienzan los esfuerzos para restaurar el sistema, para poder determinar la ocurrencia de las contingencias que dieron lugar a la regulación de frecuencia a través de una desconexión automática de carga por baja frecuencia las cuales tuvieron origen en el SER, se analizarán los informes presentados por el EOR los cuales servirán de apoyo para identificar la hora de inicio de la ocurrencia de la contingencia y con ello poder estimar la fase de interrupción calculando la diferencia en los tiempos.

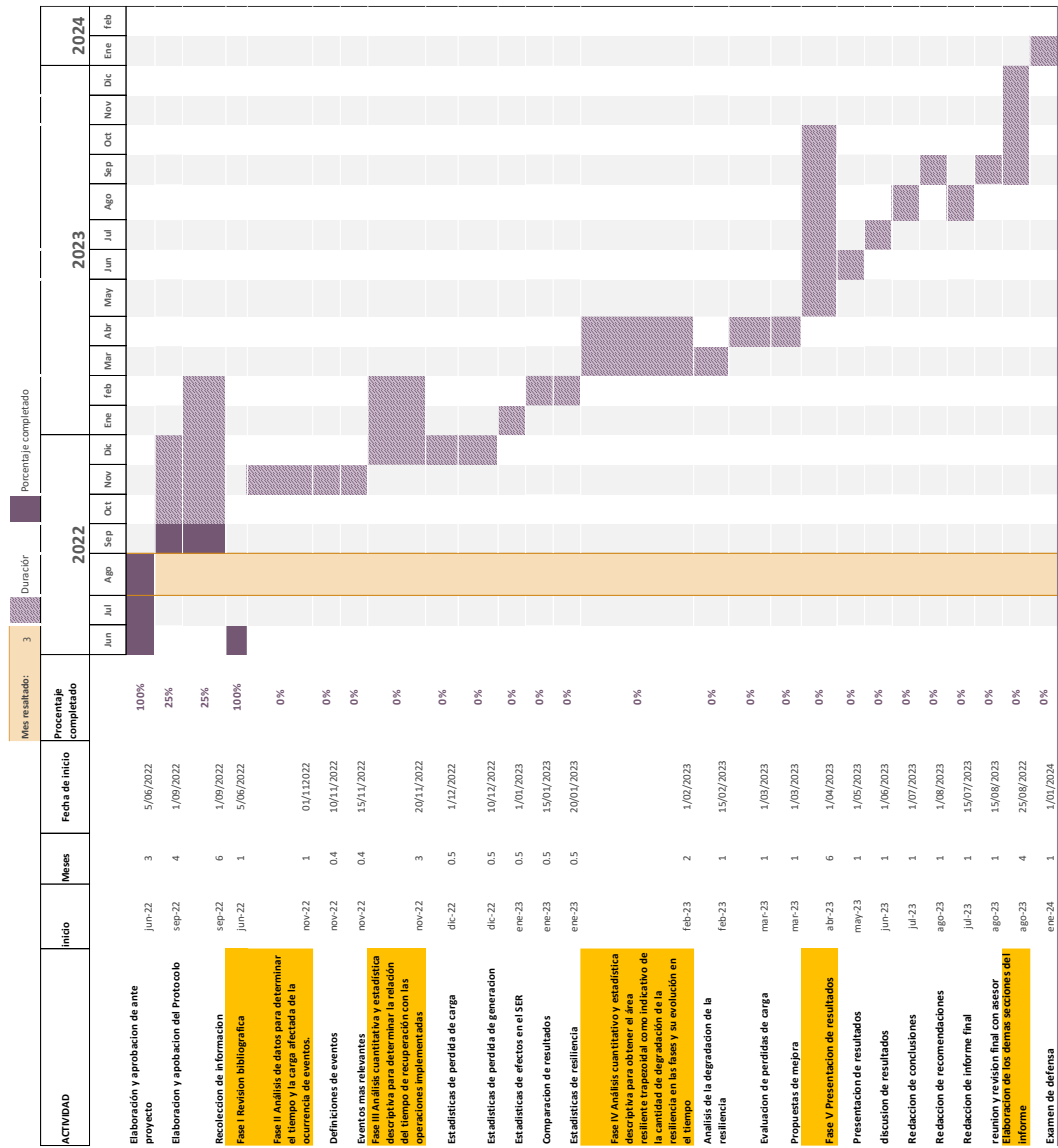
En la fase de restauración se analiza a partir desde que inicia la recuperación del sistema hasta que se conectan las cargas de las distribuidoras, es decir el sistema nuevamente se encuentra en un estado normal. Por lo tanto, el análisis de resiliencia se completa al graficar el comportamiento del sistema con las diferentes curvas obtenidas previamente a lo que se le conoce como el triángulo de resiliencia, en este último se considera el área de resiliencia trapezoidal como un indicativo de la degradación del sistema de las diferentes fases y cómo evoluciona en el tiempo.

## **10.2. Análisis estadístico**

Se hará uso de estadística descriptiva con la finalidad de obtener la relación del tiempo de interrupción con las operaciones que se implementaron para llevar el sistema a un estado post perturbación comparando cada uno de los informes analizados, con la finalidad de identificar los puntos de mejora, se emplearán gráficas y tablas para comprender el comportamiento de las variables que se analizarán. Para ello se utilizan medidas de tendencia central, gráficas y diagramas.

# 11. CRONOGRAMA

Figura 4. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El estudio de investigación es factible ya que se cuentan con todos los recursos necesarios para llevar a cabo el proceso de realización, en este se utilizará financiamiento propio.

Tabla IV. Recursos necesarios

<b>Recurso</b>	<b>Disponibilidad del recurso</b>	<b>Fuente de financiamiento</b>	<b>Cuantificación</b>
Humano	Investigador, asesor	No aplica	2 personas
Financiero	Impresiones	Investigador	Q 2,500.00
Tecnológico	Licencias de paquetes de Office 365, Internet.	Investigador	Q 720.00
Acceso a la información	Información pública	No aplica	La necesaria
Equipo	Laptop, impresora, monitor.	Investigador	Q 6,500.00
Infraestructura	Escritorio, silla de escritorio	Investigador	Q 1,500.00
Imprevistos	Cualquier imprevisto que se presente	Investigador	Q 1,000.00

Fuente: elaboración propia.



### 13. REFERENCIAS

1. Agreda, K. Erazo J. (2020). Evaluación de resiliencia de equipos de automatización en presencia de huecos de tensión (Tesis de licenciatura). Universidad de el salvador, El Salvador. Recuperado de <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/21885>.
2. Böschen S, Binder CR, Rathgeber A (enero, 2017) Resilienzkonstruktionen: Divergenz und Konvergenz von Theoriemodellen – Eine konzeptionell- empirische analyse, *GAIA Ecol Perspect Sci Soc*, 26(1), 216-224. doi: <https://doi.org/10.14512/gaia.26.S1.9>
3. Cárdenas, L. Arias, L. (septiembre, 2021). Resiliencia y vulnerabilidad de sistemas eléctricos. *Encuentro Internacional De Educación En Ingeniería*, 2021, 1-11. doi: <https://doi.org/10.26507/ponencia.1692>.
4. Carrington, N. Ma, Dobson, S. y Wang, Z. (diciembre, 2020). Extracting Resilience Statistics from Utility Data in Distribution Grids. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2020, 1-5, doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281596.
5. Caviedes, S. (2018). Coordinación automática de protecciones de sobrecorriente para un sistema de distribución ante desastres naturales (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15771>
6. CEPAL (2018). Infraestructura resiliente: un imperativo para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe. América latina y el caribe: Autor. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11362/46646>
7. Cruz, F. (2018). Propuesta de la operación de esquema de acción remedial por baja frecuencia en un sistema eléctrico de potencia



(Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12371/930>

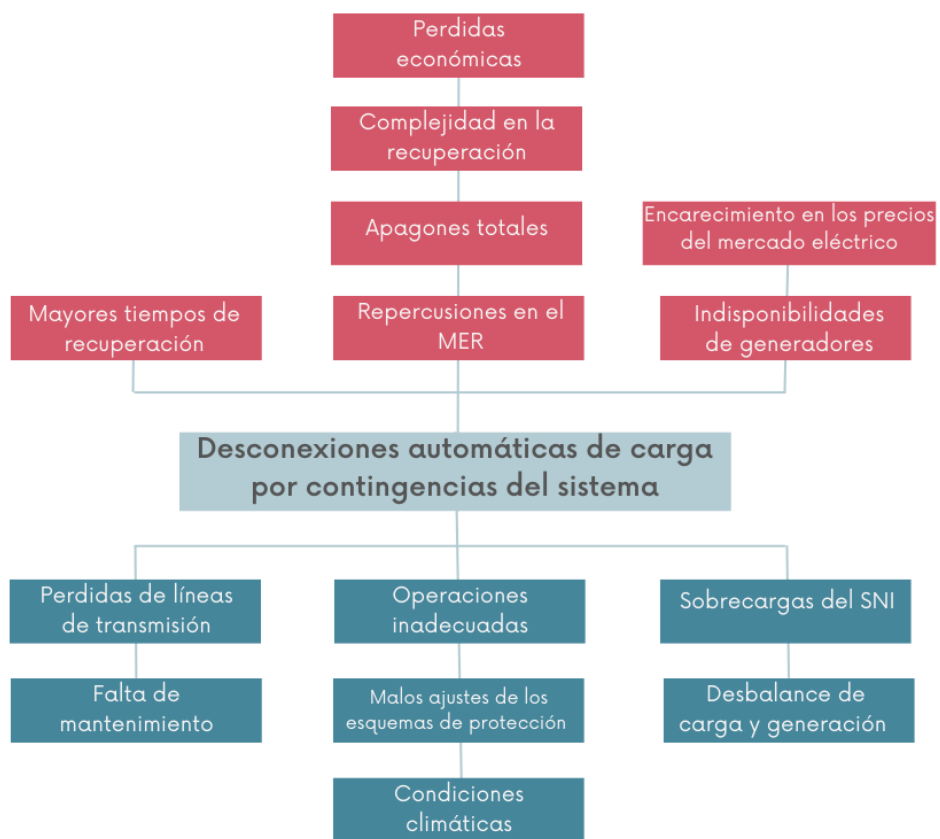
8. Dai, Y. Preece, R. Panteli, M. (2022) Risk assessment of cascading failures in power systems with increasing wind penetration, *Electric Power Systems Research*, 211(1), 1-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108392>
9. EPRI. (2016). Electric Power System Resiliency CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, California: Autor. Recuperado de <https://www.epri.com/research/products/000000003002007376>
10. Jesse, BJ., Heinrichs, H. & Kuckshinrichs, W. (julio, 2019). Adapting the theory of resilience to energy systems: a review and outlook. *Energy, Sustainability and Society*, 9(1), 1-27. doi: <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0210-7>
11. Lasluisa, J. Carrión, D. (julio, 2020). Resiliencia de Sistemas Eléctricos de Potencia mediante la Conmutación de Líneas de Transmisión – Estado del arte. *Revista de I+D Tecnológico*, 16(2), 1-11. doi: <https://doi.org/10.33412/idt.v16.2.2834>
12. Ledesma, P. (2020). *Análisis dinámico y control de sistemas eléctricos*. España: Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10016/31518>
13. Melo, J. Cortés, C. (septiembre, 2016). Análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en las variables con lógica difusa tipo 2. *Revista Tecnura*, 20(49), 100-119. doi: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a07>
14. Panteli, M. Mancarella, D. Trankas, N. Kyriakides, E. y. Hatziaargyriou, D. (2017). Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(6), 4732-4742. doi: 10.1109/TPWRS.2017.2664141

15. Sánchez, P. (2020). Estabilidad de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia considerando generación no inercial (tesis de licenciatura). Universidad politécnica salesiana sede quito, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18394>
16. Stankovic, A. Tomsovic, K. Co-Chairs. (abril, 2018). The Definition and Quantification of Resilience. *IEEE PES Industry Technical Support Task Force*. Technical report PES-TR65, 1-4. Recuperado de [https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PESTR0065\\_04-18.html](https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PESTR0065_04-18.html)
17. Tamvakis, P. Xenidis, Y. (marzo, 2013) Comparative Evaluation of Resilience Quantification Methods for Infrastructure Systems, *procedia - Social and Behavioral Sciences*, 74(1), 339-348. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.03.030>
18. Umunnakwe, A. Huang, H. Oikonomou, K. Davis, R. (2021) Quantitative analysis of power systems resilience: Standardization, categorizations, and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149(2021), 1-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111252>
19. Villalba, I. (2021). Estudio de estabilidad de la frecuencia para una red eléctrica débil ante la integración de energía de energía undimotriz en un sistema (Tesis doctoral). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10553/111019>
20. Villamarín, A., Haro, R., Aguirre, M., & Ortíz, D. (enero, 2021). Evaluación de Resiliencia en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano frente a Eventos Sísmicos. *Revista Técnica "Energía"*, 17(2), 18-28. doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.440>
21. Vugrin, E. Castillo, A. Silva-Monroy, C. (febrero, 2017) Resilience Metrics for the Electric Power System: A Performance-Based approach. *Sandia National Laboratories*. SAND2017-1493, 1-49. doi: <https://doi.org/10.2172/1367499>

22. Xu, Y. Liu, C. -C. Schneider, K. Tuffner, F. y Ton, D. (enero, 2018) Microgrids for Service Restoration to Critical Load in a Resilient Distribution System, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9 (1), 426-437. doi: 10.1109/TSG.2016.2591531

## 14. APÉNDICES

### Apéndice 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.