



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESTIMAR LA INCIDENCIA DE FALLA EN LA RED DE  
DISTRIBUCIÓN ORIGINADAS POR CONDICIONES CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE  
OCCIDENTE DE UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD**

**Luis René Mena Ramírez**

Asesorado por el Msc. Ing. Gabriel Armando Velásquez Velásquez

Guatemala, julio de 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESTIMAR LA INCIDENCIA DE FALLAS EN LA RED DE  
DISTRIBUCIÓN ORIGINADAS POR CONDICIONES CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE  
OCCIDENTE DE UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA ELECTRICIDAD**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUIS RENÉ MENA RAMÍREZ**

ASESORADO POR EL MSC. ING. GABRIEL ARMANDO VELÁSQUEZ VELÁSQUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, JULIO DE 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin 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. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
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 ESTIMAR LA INCIDENCIA DE FALLAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ORIGINADAS POR CONDICIONES CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA ELECTRICIDAD**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 06 de mayo de 2022.

**Luis René Mena Ramírez**





**EEPFI-PP-0624-2022**

Guatemala, 26 de abril 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 ESTIMAR LA INCIDENCIA DE FALLA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ORIGINADAS POR CONDICIONES CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos**, presentado por el estudiante **Luis René Mena Ramírez** carné número **201020438**, 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 Energía Y Ambiente.

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. Gabriel Armando Velásquez Velásquez  
Asesor(a)

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



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







EEP-EIME-0624-2022

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 ESTIMAR LA INCIDENCIA DE FALLA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ORIGINADAS POR CONDICIONES CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD**, presentado por el estudiante universitario **Luis René Mena Ramírez**, 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

The image shows a handwritten signature in black ink over a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

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

Guatemala, abril de 2022



Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.521.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ESTIMAR LA INCIDENCIA DE FALLA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ORIGINADAS POR CONDICIONES CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE OCCIDENTE DE UNA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD**, presentado por: **Luis René Mena Ramírez**, 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, julio de 2022

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Mi Padre Celestial</b>	Por crear el plan de felicidad que me permite vivir eternamente con mi familia.
<b>Jesucristo</b>	Por su sacrificio expiatorio y los milagros que ha hecho en mi vida.
<b>El Espíritu Santo</b>	Por guiarme, inspirarme y fortalecerme durante estos años de estudio.
<b>Mi padre</b>	Mauricio Mena, por darme su amor y su ejemplo de ser un profesional.
<b>Mi madre</b>	Irma de Mena, por su infinito e incondicional amor y el excelente cuidado que me ha dado.
<b>Mis hermanos</b>	Abinadí, Kevin y Julia Mena, por su amor y apoyo en todas las cosas.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi segunda casa durante mi formación profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme el conocimiento que permitirá desarrollarme como profesional.
<b>Escuela de Postgrado</b>	Por haberme brindado la información necesaria para realizar este diseño de investigación.
<b>Mi asesor</b>	Msc. Ing. Gabriel Velásquez por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
<b>Mis amigos y compañeros del trabajo</b>	Por haberme apoyado con el tiempo necesario para continuar estudiando.
<b>Familia y amigos en general</b>	



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
3.1. Contexto general .....	11
3.2. Descripción del problema .....	12
3.3. Formulación del problema .....	13
3.3.1. Pregunta central .....	13
3.3.2. Preguntas auxiliares .....	14
3.4. Delimitación del problema .....	14
4. JUSTIFICACIÓN .....	17
5. OBJETIVOS .....	21
5.1. General.....	21
5.2. Específicos .....	21
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN .....	23

7.	MARCO TEÓRICO .....	25
7.1.	Redes eléctricas de distribución.....	25
7.1.1.	Elementos de la red de distribución .....	26
7.1.1.1.	Subestaciones eléctricas de distribución .....	27
7.1.1.2.	Re-conector de cabecera .....	27
7.1.1.3.	Re-conector de media línea .....	28
7.1.2.	Fallas en las redes eléctricas de distribución .....	29
7.1.2.1.	Falla de origen externo.....	29
7.1.2.2.	Falla de origen interno.....	30
7.1.2.3.	Caracterización eléctrica de las fallas ..	31
7.1.3.	Mantenimiento en sistemas eléctricos de distribución .....	33
7.1.3.1.	Mantenimiento predictivo.....	34
7.1.3.2.	Mantenimiento preventivo .....	34
7.1.3.3.	Mantenimiento correctivo .....	35
7.2.	Condiciones climáticas.....	35
7.2.1.	Elementos del clima .....	36
7.2.1.1.	Viento y temperatura .....	36
7.2.1.2.	Lluvia y humedad .....	38
7.2.2.	Factores del clima .....	39
7.2.2.1.	Latitud y altitud .....	39
7.2.2.2.	La continentalidad y corrientes marinas.....	40
7.3.	Modelos de regresión estadísticos .....	40
7.3.1.	Definición.....	40
7.3.2.	Tipos de modelo de regresión .....	42
7.3.2.1.	Regresión lineal simple .....	42
7.3.2.2.	Regresión lineal múltiple .....	43

	7.3.2.3.	Modelo de regresión no lineal.....	43
	7.3.3.	Supuesto del modelo .....	44
	7.3.3.1.	Linealidad .....	44
	7.3.3.2.	Normalidad .....	45
	7.3.3.3.	Independencia .....	46
	7.3.3.4.	Homocedasticidad .....	47
	7.3.3.5.	Homogeneidad .....	47
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	49
9.		METODOLOGÍA.....	53
	9.1.	Características del estudio .....	53
	9.2.	Unidades de análisis .....	54
	9.3.	Variables.....	54
	9.4.	Fases del estudio .....	55
	9.4.1.	Fase 1: registro y análisis de información.....	56
	9.4.2.	Fase 2: análisis de fallas y viento .....	59
	9.4.3.	Fase 3: análisis de fallas y la lluvia.....	60
	9.4.4.	Fase 4: propuesta de mantenimiento .....	61
10.		TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	63
11.		CRONOGRAMA.....	67
12.		FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	69
13.		REFERENCIAS.....	71



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Mapa de cobertura Energuate.....	12
2.	Sistema eléctrico de potencia .....	25
3.	Diagrama unifilar de red de distribución .....	28
4.	Circuito eléctrico con RC y RML .....	29
5.	Falla monofásica a tierra .....	31
6.	Tipos de fallas bifásicas .....	32
7.	Tipos de fallas trifásicas .....	33
8.	Formación de viento.....	37
9.	Ciclo del agua .....	38
10.	Regresión lineal de Y en X.....	41
11.	Cronograma .....	67

### TABLAS

I.	Base de datos fallas en red de distribución.....	56
II.	Fallas mensuales en la red de distribución .....	57
III.	Velocidad promedio mensual de viento.....	58
IV.	Cantidad mensual de lluvia registrada .....	58
V.	Base de datos de la investigación.....	59
VI.	Base de datos de fallas y viento.....	60
VII.	Base de datos de fallas y cantidad de lluvia.....	60
VIII.	Recursos para la investigación .....	69



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Grados Celsius
°	Grados
Hz	Hercio
h	Horas
=	Igual que
kW	Kilovatio
km	Kilómetro
kV	Kilovoltio
>	Mayor que
MW	Mega Vatio
MWh	Mega vatio hora
<	Menor que
m	Metro
$m^3$	Metro cúbico
m/s	Metro por segundo
<b>m.s.n.m.</b>	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
W	Vatio



## GLOSARIO

<b>Anemómetro</b>	Equipo utilizado para medir la velocidad del viento, temperatura y humedad de un lugar en específico. Recopila información cada 15 minutos durante un tiempo determinado. Esa información es descargada para ser analizada.
<b>Conexión a tierra</b>	Se refiere a una conexión de corto circuito entre una fase y la referencia de 0 V.
<b>Corto circuito</b>	Condición en la que una fase tiene conexión directa o indirecta con otra fase o con tierra.
<b>DEOCSA</b>	Distribuidora de electricidad de occidente.
<b>DEORSA</b>	Distribuidora de electricidad de oriente.
<b>Desplome</b>	Se refiere a una condición en la que un poste de tendido eléctrico pierde estabilidad debido a erosión en el suelo donde está instalado.
<b>EEGSA</b>	Empresa Eléctrica de Guatemala S. A.
<b>Fase</b>	Se refiere a los cables que transportan la electricidad. Pueden ser monofásicos, de un cable. Bifásicos, de dos cables. Trifásicos, de tres cables. A demás de lo

anterior, cada fase tiene un desfase de  $120^\circ$  eléctricos.

<b>GDR</b>	Generador Distribuido Renovable.
<b>Incidencia</b>	Cantidad de fallas o interrupciones del suministro eléctrico de la red de distribución.
<b>INSIVUMEH</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
<b>Interrupción</b>	Condición de pérdida de continuidad en el suministro eléctrico.
<b>Media tensión</b>	Nivel de voltaje entre 1000 V y 34500 V. En esta investigación se refiere específicamente a un nivel de voltaje de 13800 V.
<b>Pluviómetro</b>	Equipo utilizado para medir el volumen de lluvia en milímetros cúbicos que cae en un determinado lugar.
<b>Red de distribución</b>	Es un compuesto de estructuras de tendido eléctrico, cables, equipos de medición, transformadores que tienen como fin transportar la electricidad de un lugar de generación hasta el usuario final.
<b>SCADA</b>	Programa de computadora que recopila, muestra y permite controlar equipos instalados en la red de distribución.

<b>Tensión</b>	Se refiere al voltaje en la red de distribución.
<b>Transformador</b>	Equipo eléctrico utilizado para reducir o elevar el nivel de tensión.
<b>Usuario regulado</b>	Persona individual o jurídica que tiene un contrato vigente con una de las empresas distribuidoras de electricidad.



## RESUMEN

En Guatemala, existen diferentes empresas encargadas de distribuir la electricidad por todo el país. Esto significa que se puede encontrar líneas de distribución que recorren cientos de kilómetros para ir desde una subestación eléctrica hasta el usuario final. Estos usuarios dependen de la continuidad del servicio eléctrico para desarrollar sus actividades de forma habitual.

Una interrupción en el suministro eléctrico significa que las personas, empresas, industrias y comercios no sean capaces de desarrollar sus actividades de forma continua lo que se traduce en pérdidas económicas para personas, comercios, industria y para el país en general. Por lo tanto, es de suma importancia para la empresa distribuidora de electricidad establecer cuáles son las causas que originan pérdidas de continuidad en el suministro eléctrico.

El presente diseño de investigación busca establecer la relación que pudiera existir entre las condiciones climáticas, como lo son las fuertes lluvias y los fuertes vientos, que afectan una determinada región de cobertura de la empresa distribuidora y las incidencias de falla que son registradas en a lo largo de la línea de distribución por los equipos tele controlados y otros equipos de protección. Para lograr eso, se realizará un análisis estadístico de la información que esta dividido por fases que al irse completando permitirán establecer el modelo que pueda predecir el comportamiento de los datos. Esta información puede ser utilizada para mejorar los planes de mantenimiento preventivo de la distribuidora al mismo tiempo que se tiene un control del ciclo de vida de los equipos lo que permite reducir el impacto ambiental.



# 1. INTRODUCCIÓN

En Guatemala el uso de la electricidad se considera de carácter de primera necesidad, es utilizada en prácticamente todos los aspectos de la vida cotidiana. La continuidad del suministro de energía eléctrica garantiza que las actividades domésticas, comerciales, industriales, etc. sean realizadas con normalidad. La falta de energía eléctrica puede llegar a ocasionar problemas de continuidad de producción en una empresa, así como, retrasar el avance de la economía del país.

Existen diversas causas por las que el suministro de energía eléctrica se ve afectado. En esta investigación se han clasificado dos principales fuentes que originan fallas en la red de distribución, condiciones externas e internas. Dentro de las condiciones externas, se pueden encontrar las causas de falla por las condiciones climáticas principalmente fuertes lluvia y vientos. Por lo tanto, esta investigación pretende establecer si existe una relación entre las fallas en la red de distribución con un nivel de voltaje de 13.8 kV y las condiciones climáticas, específicamente, los fuertes vientos y la cantidad de lluvia.

Encontrar una solución al problema planteado supone una mejora en la calidad del suministro eléctrico brindado por la empresa distribuidora de electricidad. Puesto que las interrupciones causadas por condiciones externas, como los fuertes vientos y la lluvia, pueden ser contemplados con anticipación, por otro lado, los recursos técnicos y económicos de la empresa distribuidora de electricidad son optimizados.

El modelo desarrollado en esta investigación para estimar las fallas en la red de distribución podrá brindar información de la cantidad de fallas en la red eléctrica esperados según las condiciones climáticas pronosticadas. Este resultado puede ser utilizado para desarrollar un plan de mantenimiento preventivo que pueda atender de forma oportuna aquellos puntos en la red eléctrica que podrían ocasionar una falla y, por lo tanto, interrupción en el servicio suministrado. También, puede obtenerse de forma indirecta el ciclo de vida de los equipos tele controlados instalados a lo largo de la red de distribución que detectan y realizan la apertura y cierre de segmentos de línea para aislar una falla, brindando una mejora en el control del ciclo de vida de dichos equipos.

Para desarrollar la solución al problema planteado, se realiza un análisis estadístico descriptivo e inferencial aplicado a una base de datos que contiene información de fallas en la red de distribución, velocidad de viento y precipitaciones en un periodo determinado. Al ser un análisis estadístico, se utilizan herramientas tecnológicas, tales como, programas de computadora que pueden analizar dicha información. Luego de aplicar las pruebas correspondientes al modelo desarrollado en esta investigación, se tiene la validez estadística necesaria para explicar el comportamiento de los datos en análisis.

Los recursos necesarios para esta investigación se consideran los siguientes: recursos humanos, tecnológico y de acceso a la información. Estos recursos son obtenidos por el investigador permitiendo realizar la investigación de principio a fin sin presentar inconvenientes.

Esta investigación está dividida en capítulos que tiene un orden lógico secuencial. En los primeros capítulos se realiza una revisión bibliográfica de investigaciones relacionadas al tema, se describe con mayor detalle la problemática y se plantean los objetivos que se deben alcanzar al finalizar la

investigación. Los siguientes capítulos hacen una recopilación de los conceptos y teoría necesaria para entender el proceso para obtener el modelo presentado en esta investigación y se describe la metodología utilizada para obtener la solución.

Finalmente, los últimos capítulos de esta investigación muestran el desarrollo del análisis estadístico aplicado a la base de datos analizada, se presentan los resultados obtenidos de la investigación con su respectiva explicación y se presentan las conclusiones correspondientes y recomendaciones necesarias.



## 2. ANTECEDENTES

Para comenzar con esta investigación se realizó una revisión de fuentes bibliográficas relacionadas al tema desarrollado. Esto nos brinda un panorama general de la manera en que distintos investigadores abordan la problemática de las fallas en el suministro eléctrico de media tensión y sus causas. También, se analizan las metodologías y propuestas de solución a la problemática planteada. A continuación, encontramos algunas de ellas:

Camacho (2017) propone un método para localizar fallas utilizando Smart feeder instalados en el circuito de distribución. Estos equipos están censando las magnitudes de voltaje por fase y comparándolas constantemente con un valor de referencia. Cuando se cense un valor de 0, entonces, el equipo que realizó el censado está detectando una falla.

En la misma investigación, Camacho (2017) indica que por medio de análisis vectorial de las señales de voltaje se puede determinar un vector resultante que se denomina vector de observación. Este vector de observación debe ser comparado con una matriz vectorial dispersa que puede ser calculada por medio de una matriz de impedancias. Estos equipos ubicados en puntos estratégicos del circuito monitoreado en tensión proporcionan las señales que son comparadas con el vector de observación. Cuando la señal recibida difiere del vector de observación, entonces, el nodo que envía esa señal está detectando una interrupción en el circuito de media tensión monitoreado. Además, indica que “generalmente la mayoría de las fallas son causadas por condiciones climatológicas adversas como descargas atmosféricas” (p. 5).

En la tesis de Rincon (2019) se expone que una empresa de distribución eléctrica debe ser capaz de proporcionar un servicio de calidad, por lo tanto, debe ser confiable, segura y eficiente para cubrir la demanda prevista del sistema eléctrico. Para obtener una mejora en los procesos que permitan que el servicio prestado cumpla con los estándares requeridos, se debe realizar un estudio de las interrupciones en el sistema de distribución con el propósito de establecer el funcionamiento estándar. Además, se explica que para lograr determinar el funcionamiento típico del circuito de media tensión se puede realizar un análisis de registros de fallas ocurridos en un periodo específico de tiempo. Luego de este análisis se puede elaborar un modelo matemático que proporcione resultados válidos que explican el comportamiento del sistema analizado.

Finalmente, para que el usuario final reciba el servicio de eléctrico con la calidad requerida es importante para la empresa de distribución:

Conocer el comportamiento de la red de distribución para poder garantizar la confiabilidad del sistema. Realizar un análisis de los datos de fallas de componentes, equipos y sistemas, con el objetivo de pronosticar el comportamiento de las redes eléctricas, para una adecuada planeación del mantenimiento. (Rincon, 2019, p. 5)

El siguiente antecedente analizado los autores Morales, Mora y Vargas (2007) exponen que los servicios suministrados en media y baja tensión son más complejos y extensos, por lo tanto, encontrar el lugar dónde se originó una interrupción en el servicio suministrado en media tensión es mucho más difícil que en una red de alta tensión. Además, se expone que normalmente no se tiene información de cada segmento del circuito que se utiliza para suministrar electricidad, por el contrario, la información se registra como un todo desde la subestación de distribución. El artículo propone utilizar una metodología basada

en la impedancia y reactancia del circuito eléctrico. El modelo fue probado en una red de distribución real con estimaciones de error inferiores al 2.5%.

En el mismo artículo se indica lo siguiente:

Las redes experimentan fallas causadas por tormentas, relámpagos, fallas en los aislamientos y cortocircuitos causados por plantas, animales entre otros agentes externos. Entonces, la confiabilidad del sistema de distribución ante cualquier falla que haya ocurrido depende de su rápido aislamiento, reparación y restauración del servicio. (Morales et ál., 2007, p. 49)

Lo anterior sirve como indicativo que realizar un análisis de datos de las causas y de las fallas de una red de distribución eléctrica puede brindar información que ayude a establecer el comportamiento específico y a encontrar soluciones para brindar servicios que cumplan con los estándares de calidad de servicio.

Otro método utilizado para localizar e identificar fallas es el que se encuentra en el artículo de Gómez, Peña y Hernández (2012). En este artículo se propone utilizar medidores electrónicos que se instalan en puntos estratégicos en el sistema de distribución de baja tensión. Estos medidores guardan información relevante del sistema eléctrico. Luego de analizar la información es posible determinar el punto de origen de una interrupción en el suministro eléctrico, esto contribuye a reducir los costos asociados a la operación del sistema de distribución de baja tensión.

Además, en el artículo se expone que un crecimiento de nuevos usuarios que demandan del servicio eléctrico significa un crecimiento en la infraestructura

del circuito eléctrico que es necesaria para llegar a todos los usuarios. Cuando el sistema es más grande y complejo, determinar dónde se origina una interrupción también se vuelve más complejo. La frecuencia de las interrupciones también podría incrementar.

Los transformadores de distribución pueden ser utilizados como nodos para los medidores electrónicos utilizados. Mientras más nodos sean instalados en puntos estratégicos más confiable puede llegar a ser un circuito eléctrico y, por lo tanto, “entre más puntos se tomen del sistema eléctrico para la identificación y localización de fallas, mayor será la precisión de diagnóstico de discontinuidad en el servicio energético” (Gómez et ál., 2012, p. 113).

Finalmente, en la investigación de Pabón (2016) indica que para la predicción, localización y clasificación de eventos que ocurren en la red de distribución es posible utilizar técnicas de análisis matemáticos basada en los datos recopilados en base de datos de corrientes y voltajes. La metodología que se plantea utilizar es el de la transformada de Wavelet. Para ello, es necesario desarrollar dos algoritmos para diagnosticar, clasificar y localizar interrupciones en el sistema eléctrico de distribución. Para este análisis es necesario conocer la longitud del segmento de circuito, medido desde la fuente, y la velocidad de propagación de la onda.

En la misma investigación se expone que “al ocurrir una falla en la línea de distribución el sistema presenta un incremento en sus componentes, generando señales a diferentes frecuencias y magnitud en comparación con la componente fundamental” (Pabón, 2016, p 3). Lo anterior sugiere que utilizar la transformada de Wavelet es una herramienta aplicada al análisis de ondas viajeras en las líneas de distribución. Esas alteraciones en la red de distribución son registradas

y analizadas para poder determinar el tipo de falla, la posible ubicación y características propias de la red.

Además, en la investigación se resalta que las fallas pueden ser originadas por condiciones externas como las climáticas y también pueden ser originadas por condiciones internas como desbalances en la red, cortocircuitos entre fases y desgaste de equipos, por lo tanto, “el diagnóstico oportuno de las fallas proporcionará mayor velocidad de reconexión del servicio, disminución de costos, mantenimiento preventivo/correctivo de los equipos y mayor fiabilidad a la operación del sistema” (Pabón, 2016, p. 2).



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

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

Hoy en día el uso de electricidad para satisfacer las necesidades de las personas se ha vuelto de suma importancia y de carácter de primera necesidad, por lo que, las interrupciones en este servicio pueden afectar de gran manera la forma en la que las personas de una comunidad, de una ciudad e incluso países enteros llevan a cabo sus actividades cotidianas. La falta del servicio de energía eléctrica puede ocasionar pérdidas en comercios, empresas y la industria en general de un país originando un atraso en el crecimiento económico de ese país.

Estas interrupciones en las redes de distribuciones pueden ser originadas por diversos motivos, tales como, interrupciones programadas en la red de distribución para realizar trabajos de mantenimiento o bien interrupciones originadas por condiciones externas como los fuertes vientos y las lluvias que pudieran existir en determinada región dónde existen estas redes de distribución, la manipulación que terceras personas puedan realizar, y dependiendo de la región también la vegetación en cercanía a la red de distribución, entre otras.

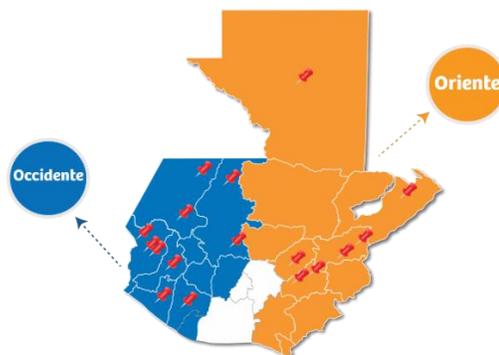
Para poder atender las interrupciones originadas por condiciones externas o ajenas a la empresa distribuidora y restablecer prontamente la falta de energía eléctrica se deben llevar a cabo las acciones adecuadas y oportunas que permitan utilizar de forma eficiente los recursos con los que se dispone para que el usuario final no se vea perjudicado con un tiempo prolongado sin el servicio eléctrico.

### 3.2. Descripción del problema

Para satisfacer la demanda de energía eléctrica en Guatemala existen diversas generadoras de energía eléctrica distribuidas en todo el territorio nacional que generan la energía necesaria para toda la población. Para poder llevar esa energía a todos los rincones del país es necesario que exista una red de estructuras y cables y equipos instalados en dicha red para llevar a cabo esta tarea. Debido a las grandes distancias que se deben cubrir esta red de estructuras debe ser dividida en dos partes: La red de transporte y la red de distribución.

En Guatemala existen tres principales empresas dedicadas a la distribución de energía eléctrica las cuales son: EEGSA que tiene un área de cobertura en el departamento de Guatemala, Sacatepéquez y una parte de Escuintla. DEORSA, que tiene un área de cobertura en la región oriental del país y, DEOCSA, que tiene un área de cobertura en la región de occidente del país. Lo anterior puede ser visto de mejor forma en la siguiente imagen:

Figura 1. **Mapa de cobertura Energuate**



Fuente: Energuate. *Mapa de cobertura*. Consultado 28 de marzo de 2022. Recuperado de [https://www.energuate.com/area\\_de\\_cobertura](https://www.energuate.com/area_de_cobertura).

La región en azul corresponde al área de cobertura de DEOCSA y la naranja a DEORSA y finalmente, el área en color blanco corresponde al área de cobertura de EEGSA.

En la región de occidente se han registrado más de 1000 fallas en la red de distribución con nivel de voltaje de 13.8 kV y de esas fallas registradas, más de la mitad son atribuidas a condiciones climáticas como los fuertes vientos y las lluvias. Los usuarios regulados que pertenecen al área de cobertura de DEOCSA constantemente se quejan de que pasan mucho tiempo sin el servicio de energía eléctrica y que la frecuencia con que no cuentan con este servicio es muy alta principalmente en la época de invierno.

Lo anterior sugiere que debe ser una prioridad para la empresa distribuidora de occidente, analizar una serie de datos históricos de las fallas imprevistas en la red de distribución de media tensión con un nivel de voltaje de 13.8 kV con causal de falla registrada como condiciones climáticas fuerte lluvia o viento para poder dimensionar de forma adecuada y eficiente los recursos con los que dispone y de esta forma poder brindar una pronta respuesta ante las fallas imprevistas en la red de distribución.

### **3.3. Formulación del problema**

Para el desarrollo de este diseño de investigación se plantearon las siguientes preguntas.

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

¿Cuál es la relación que pudiera existir entre las fallas en la red de distribución de 13,8 kV en la región de occidente de la distribuidora de electricidad

y las condiciones climáticas, fuertes lluvia y viento, de la región de occidente de Guatemala?

### **3.3.2. Preguntas auxiliares**

- ¿Qué relación existe entre la cantidad de lluvia en [mm] que se registra en la región de occidente y las fallas en la red de media tensión de la empresa distribuidora de electricidad?
- ¿Qué relación existe entre la velocidad del viento en [m/s] registrada en la región de occidente y las fallas en la red de media tensión de la empresa distribuidora de electricidad?
- ¿Cuál es el plan de mantenimiento para la red de media tensión, basado en el modelo propuesto, aprovecha de forma eficiente los recursos técnicos, económicos y ambientales de la empresa distribuidora de electricidad?

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

Esta investigación está limitada a analizar las fallas imprevistas en la red de distribución de 13.8 kV en la región de sur occidente de Guatemala y en la región de sur occidente dónde tiene cobertura una empresa distribuidora de electricidad. En un periodo de un año comprendido del año 2018 al 2019. Las variables analizadas en esta investigación se limitan a:

- Fallas imprevistas en la red de media tensión 13.8 kV con causa legalizada como condiciones climáticas fuerte lluvia o viento.

- La cantidad de lluvia en [mm] registrada en el periodo de 2018 a 2019.
- La velocidad de viento en [m/s] registrada en el periodo de 2018 a 2019.



## 4. JUSTIFICACIÓN

El estudio de investigación desarrollado en este trabajo está basado en la línea de investigación de la maestría en energía y ambiente relacionada al área energética en la sección de gestión y uso eficiente de la energía, utilizando como bases el subíndice (b) relacionado a los aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos, y en el subíndice (k) relacionado al diseño de proyectos de distribución eléctrica. En el área ambiental en la sección de gestión y manejo ambiental en el subíndice (b), estimación del ciclo de vida, mitigación y medidas de mejora continua.

El aporte que pretende brindar la realización de esta investigación es la estimación de las incidencias de fallas en la red de distribución de media tensión operada en la región de occidente de Guatemala y una propuesta de planificación de mantenimientos basado dicha estimación. El resultado permitirá utilizar de forma eficiente los recursos de los que dispone la empresa encargada de operar la red de distribución en la región de occidente sin dejar de lado los aspectos técnicos y de calidad de servicio relacionados.

Se desarrollará un modelo estadístico de regresión que relacione las variables que se muestran como principales causantes de fallas en la red de distribución. El modelo presentado relacionará las variables de velocidad de viento en [m/s] y la cantidad de lluvia en [mm] con las fallas registradas por los equipos instalados en subestaciones de distribución y equipos instalados a lo largo de la red de distribución en un periodo determinado. El modelo presentado será capaz de brindar información relevante de la cantidad de fallas para la

empresa distribuidora encargada de operar la red de distribución de media tensión en la región de occidente de Guatemala.

Así mismo, las personas, empresas, industrias y en general toda persona individual o jurídica que tenga un suministro contratado con la empresa distribuidora será beneficiada con este estudio de investigación. Las redes de distribución de media tensión son más grandes y complejas de operar que una red de transmisión de alta tensión, por lo que, las fallas que se presentan en este tipo de redes generan interrupciones que muchas veces son de tiempo prolongado.

El modelo presentado brindará a la empresa encargada de operar la red de distribución información de la cantidad de fallas y con esta información la empresa distribuidora será capaz preparar un plan de mantenimiento preventivo que permita actuar de forma oportuna ante la presencia de una falla en la red de distribución. Esto traerá una reducción en los tiempos de respuesta, así mismo, el parámetro de incidencias de fallas brindado por el modelo presentado podrá ser utilizado para estimar el tiempo de vida de los equipos instalados en lo largo de la red de distribución.

Es pertinente debido a que será de beneficio para toda persona individual o jurídica que tenga un servicio contratado con la distribuidora, ya sea en media tensión o baja tensión. Los usuarios que dependen de la continuidad del suministro contratado podrán tener una mejor calidad de servicio ya que las interrupciones que pudiera haber en la red de distribución serán atendidas con una pronta respuesta por parte de las cuadrillas disponibles para la atención de fallas lo que traerá una reducción del tiempo en la reparación y restauración del suministro prestado.

El análisis profesional desarrollado en las bases de datos utilizadas para desarrollar el modelo presentado en esta investigación permite preservar un beneficio ambiental y energético, puesto que, al tener la capacidad de estimar las fallas en la red de distribución también se logra de forma indirecta determinar el periodo necesario para reemplazar equipos instalados en la red de distribución permitiendo un manejo responsable de desechos reduciendo el impacto generado en el medio ambiente.



## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Desarrollar un modelo de regresión lineal que pueda estimar las incidencias de falla en la red de media tensión con nivel de tensión de 13.8 kV originadas por condiciones climáticas, lluvia y viento, en la región de occidente de una empresa distribuidora de electricidad.

### **5.2. Específicos**

- Analizar la relación que pudiera existir entre la cantidad de lluvia en [mm] que es registrada por los pluviómetros en la región de occidente y las fallas en la red de media tensión de la empresa distribuidora de electricidad.
- Determinar la relación que pudiera existir entre la velocidad del viento en [m/s] registrada por los anemómetros en la región de occidente y las fallas en la red de media tensión de la empresa distribuidora de electricidad.
- Proponer un plan de mantenimiento preventivo para la red de media tensión que aproveche de forma eficiente los recursos técnicos, económicos y ambientales de la empresa distribuidora.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN**

Actualmente la red de distribución de Guatemala representa una parte vital en la vida de los guatemaltecos, por lo que, las interrupciones en esta red de distribución afectan en gran manera a la población en general. Las interrupciones en la red de distribución originadas por condiciones climáticas son las que presentan una mayor cantidad de incidencias en un periodo determinado. La empresa encargada de operar la red de distribución no posee estudios de las causas externas más comunes, como lo son las condiciones climáticas, por lo tanto, las interrupciones por condiciones climáticas generan una deficiente calidad del suministro proporcionado.

El análisis realizado para esta investigación tiene impacto en el ámbito nacional específicamente en el área más afectada por las interrupciones originadas por condiciones climáticas en Guatemala. Se realizará un análisis estadístico de los registros históricos de fallas registrados por los diferentes equipos instalados en la red de distribución y los registros de velocidad de viento y milímetros de lluvia en un periodo determinado.

Esto dará como resultado un parámetro que permitirá dimensionar adecuadamente los mantenimientos en la red de distribución, dando confiabilidad y mejorando la calidad del servicio suministrado. se desarrollará un modelo de regresión que permita estimar las incidencias de fallas en la red de distribución y basado en los resultados proporcionados por el modelo dimensionar los mantenimientos necesarios en la red de distribución

Esta investigación está basada en las líneas de investigación de la maestría en el ámbito energético para el diseño de proyectos de distribución eléctrica y los aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso eficiente de los recursos energéticos. El análisis estadístico desarrollado en esta investigación dará validez al modelo presentado para solucionar el problema planteado, así como, las normas técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución y las normas de la CNEE para la calidad de energía.

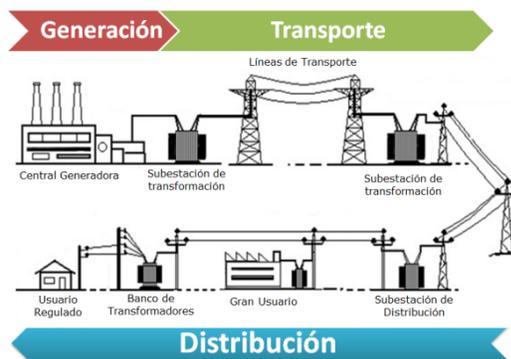
## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. Redes eléctricas de distribución

Corresponde a una serie de elementos y dispositivos instalados a lo largo de postes de madera, concreto o metálicos, que tienen como propósito llevar la energía eléctrica generada en las GDR y/o plantas generadoras de electricidad convencional hasta llegar a los usuarios regulados.

Durante este proceso la tensión se eleva y posteriormente se baja hasta un nivel adecuado para el usuario regulado. También podemos decir que “la distribución de energía eléctrica debe realizarse de tal manera que el cliente reciba un servicio continuo, sin interrupciones, con un valor de tensión adecuado que le permita operar sus aparatos eficientemente” (Yebra, 2009, p. 2).

Figura 2. Sistema eléctrico de potencia



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Sistema eléctrico*. Consultado 28 de marzo de 2022. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Subsector-EI%C3%A9ctrico-en-Guatemala.pdf>.

En la figura 2 se presenta un esquema de una red eléctrica de potencia dividida en tres etapas. La etapa de distribución es de principal interés en este trabajo.

Podría decirse que “la distribución de energía eléctrica se realiza mediante transformadores reductores de tensión, con lo que la intensidad es más alta que en el transporte, pero es más manejable para distribuir a los puntos de consumo” (Rodríguez, 2020, p. 5). Estos transformadores se encuentran distribuidos por toda la red eléctrica y pueden estar instalados en los postes de distribución o bien en las subestaciones de distribución.

A continuación, se describen algunos elementos que forman parte de las redes eléctricas de distribución y que permiten registrar y brindar información del comportamiento de la red en un periodo determinado:

### **7.1.1. Elementos de la red de distribución**

Como se mencionó anteriormente, una empresa encargada de operar un sistema eléctrico debe de ser capaz de llevar la electricidad a todos los lugares donde los usuarios regulados soliciten un servicio. Para lograr este propósito, es necesario que exista una infraestructura con los elementos adecuados y necesarios para transportarla desde el lugar de generación hasta el usuario final.

No es el objeto de esta investigación profundizar en todos los elementos existentes en los sistemas eléctricos de distribución, únicamente se menciona aquellos que forman parte importante para el análisis de las interrupciones y aquellos equipos que son capaces de registrar información relevante para el desarrollo de la investigación.

#### **7.1.1.1. Subestaciones eléctricas de distribución**

Podemos decir de las subestaciones eléctricas que “es una instalación conformada por una serie de equipos, aparatos e instrumentos destinados a dirigir o transformar la tensión eléctrica proveniente de una central de generación o a su vez de otra subestación aledaña” (Coro y Tipán, 2021, p. 10).

Entonces, la energía eléctrica generada es transportada hasta las subestaciones de distribución. En este lugar el nivel de tensión eléctrica es reducido para que pueda ser enviada a otras subestaciones de distribución o bien para que continúe su trayecto por medio de las estructuras instaladas hasta llegar al usuario final.

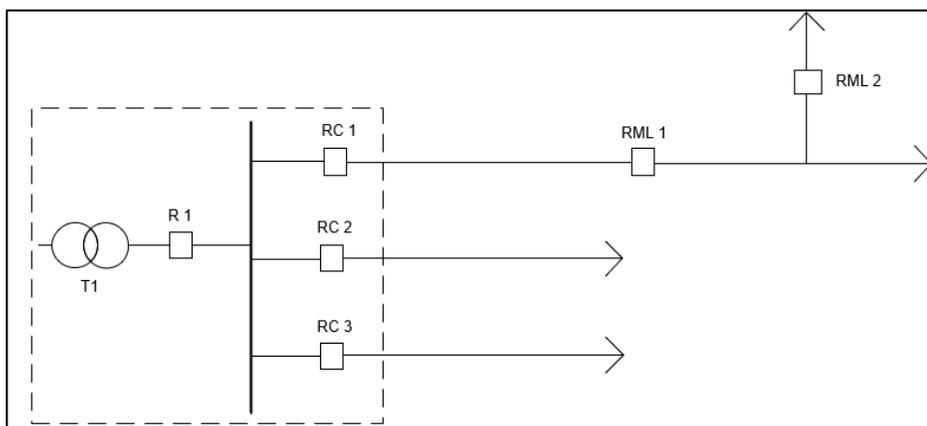
#### **7.1.1.2. Re-conector de cabecera**

Son dispositivos instalados en las subestaciones de distribución y son los encargados de proteger un circuito específico. Como definición tenemos la siguiente:

Es un dispositivo de protección capaz de detectar una sobre corriente, interrumpirla y reconectar automáticamente para re energizar la línea. Está dotado de un control que le permite realizar varias reconexiones sucesivas, pudiendo, además, variar el intervalo y la secuencia de estas reconexiones, además de ser tele controlado. (Sector Electricidad, 2017, p. 1)

En la siguiente figura se muestra un re-conector de cabecera. Está representado por un cuadro con etiqueta RC y un número consecutivo. La línea punteada indica que el RC se encuentra dentro de la subestación de distribución.

Figura 3. **Diagrama unifilar de red de distribución**



Fuente: elaboración propia.

Además, tiene la capacidad de recolectar información de las fallas que ha detectado y de ser controlados de forma remota desde el centro de operaciones de la red de la empresa distribuidora por medio de un sistema SCADA.

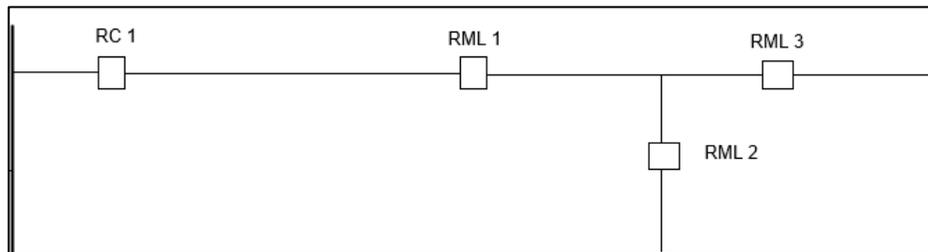
### 7.1.1.3. **Re-conector de media línea**

Son equipos eléctricos que tienen la capacidad de seccionar un segmento de circuito en caso de que sea detectada una falla de sobre corriente aguas abajo de dónde están instalados. Realizan una serie de ciclos de cierre y apertura automáticos al igual que el re-conector de cabecera. Además, estos equipos son instalados en un punto estratégico en la línea de distribución según la carga de ese circuito. Estos equipos pueden ser trifásicos o monofásicos según sea necesario.

Como se observa en la siguiente figura, el re-conector de media línea se representa con un cuadrado con la etiqueta RML y un número consecutivo. La

cantidad de RML que son instalados depende de la longitud, acceso y carga que pueda existir en un circuito de media tensión.

Figura 4. **Circuito eléctrico con RC y RML**



Fuente: elaboración propia.

### **7.1.2. Fallas en las redes eléctricas de distribución**

Una falla puede ser definida como la alteración que sufre un sistema eléctrico debido al deterioro de los elementos que componen dicho sistema. Estas alteraciones pueden ser originadas por diferentes causas, para los fines de esta investigación se clasificaron las fallas en las redes eléctricas de distribución en dos partes según su origen.

Podemos decir que, “en lo que respecta a líneas aéreas de los sistemas eléctricos, las fallas de mayor ocurrencia se corresponden con el segundo grupo, las cuales son comúnmente causadas por caídas de árboles, factores climáticos y factores de negligencia humana” (Fiaschetti, 2021, p. 97).

#### **7.1.2.1. Falla de origen externo**

Son aquellas que originan una interrupción en el suministro eléctrico afectando a los usuarios regulados de la empresa que distribuye ese servicio. La

causa de la interrupción está relacionada con agentes externos a la empresa encargada de operar el circuito de media tensión.

Debido a las características particulares, los sistemas de distribución están expuestos a fallas que pueden ser ocasionadas por diferentes causas como: degradación del material, descargas atmosféricas, rompimiento de estructuras y conductores debido a deslizamientos, fuertes vientos, automóviles, árboles, excavadoras, hurto de cables, etc. (Pico y Rodríguez, 2015, p. 5)

Para la realización de este trabajo, se establecieron las causas asociadas a fuertes vientos y las lluvias como fuentes externas de falla. Además, son registradas en una base de datos con un intervalo de tiempo específico y son reconocidas como las principales causas de interrupciones en el circuito de media tensión.

#### **7.1.2.2. Falla de origen interno**

A diferencia de las fallas originadas por fuentes externas, las originadas por fuentes internas tienen que ver más con el deterioro de los equipos o elementos instalados en toda la línea de distribución. Dentro de estas fallas “podemos encontrar diferentes tipos de fallas como las fallas monofásicas, las fallas bifásicas y las fallas trifásicas” (Bautista, 2018, p. 3).

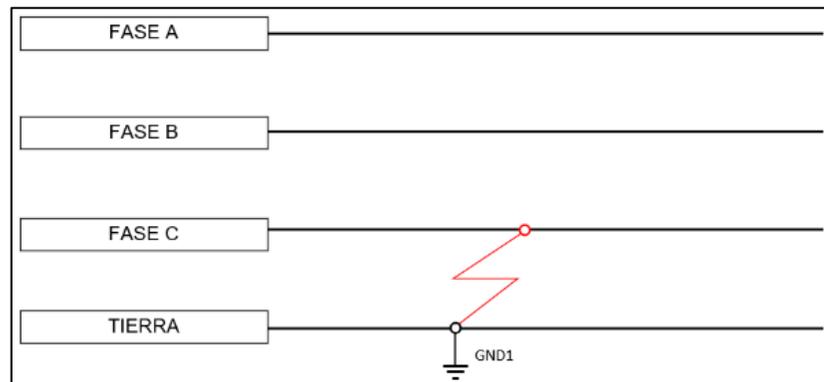
A estas fallas se pueden agregar las originadas por una mala operación de la red de distribución.

### 7.1.2.3. Caracterización eléctrica de las fallas

Como se mencionó anteriormente, podemos encontrar fallas de carácter monofásicas, bifásicas y trifásicas. Estas fallas se presentan debido a condiciones externas o internas y dependiendo del tipo que se presente así será la cantidad de usuarios afectados en una red de distribución en media tensión.

- Fallas monofásicas: se considera como una operación anormal del circuito eléctrico de distribución. Además, genera un estado de alarma en el sistema SCADA. Tiene su origen cuando una línea del circuito eléctrico entra en contacto con un elemento externo o interno que permite una conexión directa o indirecta a tierra. En la figura siguiente se puede muestra el diagrama de una falla monofásica a tierra.

Figura 5. **Falla monofásica a tierra**



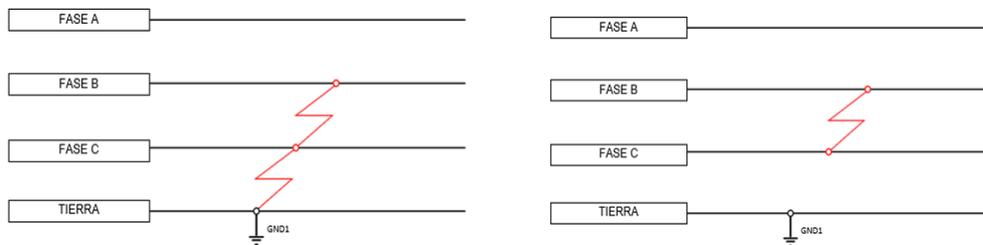
Fuente: elaboración propia.

- Fallas bifásicas: se considera como una operación anormal del circuito eléctrico de distribución. Además, genera un estado de alarma en el sistema SCADA. Tiene su origen cuando dos líneas del circuito eléctrico

entran en contacto con un elemento externo o interno que permite una conexión directa o indirecta a tierra o entre sí mismas.

En la figura siguiente, se muestra esquema de las fallas bifásicas y sus tipos.

Figura 6. Tipos de fallas bifásicas

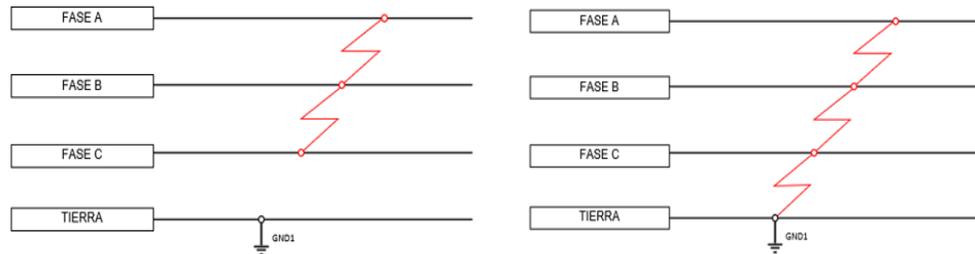


Fuente: elaboración propia.

- Fallas trifásicas: se considera como una operación anormal del circuito eléctrico de distribución y genera un estado de alarma en el sistema SCADA. Tiene su origen cuando las tres líneas del circuito eléctrico entran en contacto con un elemento externo o interno que permite una conexión directa o indirecta a tierra o entre ellas mismas.

En la figura siguiente, se presenta un esquema de las fallas trifásicas y sus tipos.

Figura 7. Tipos de fallas trifásicas



Fuente: elaboración propia.

### 7.1.3. Mantenimiento en sistemas eléctricos de distribución

La operación de un sistema de distribución de media tensión para suministrar electricidad es una tarea compleja, se debe contar con un plan de mantenimiento preventivo y correctivo que logren garantizar la continuidad del servicio prestado a los usuarios regulados, es decir, cumplir con la normativa vigente en Guatemala. De esta cuenta, una definición de mantenimiento es “el conjunto de técnicas destinadas a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible, buscando la más alta disponibilidad, y con el máximo rendimiento” (García, 2010, p. 1).

El objeto de llevar a cabo mantenimientos en las líneas de distribución de media tensión puede ser resumido en el siguiente párrafo:

Todas las instalaciones destinadas a producir un bien o un servicio, debe ser mantenida en condiciones que le permitan seguir en funcionamiento, logrando un producto de determinada calidad, y aun costo lo más bajo posible. Quien se dedique al mantenimiento de cualquier tipo de instalación debe ofrecer la reparación de los desperfectos que surjan y las

modificaciones necesarias para que estas no aparezcan. (Leyton, 2018, p. 29)

El párrafo anterior indica que un adecuado plan de mantenimiento permite que la empresa distribuidora de la electricidad entregue un servicio que cumpla con los estándares de calidad esperados. Además, los usuarios perciben una menor discontinuidad por desperfectos del servicio contratado.

#### **7.1.3.1. Mantenimiento predictivo**

La siguiente definición se adapta a los propósitos de esta investigación, por lo que un sistema eléctrico debe contar con un plan predictivo.

Está basado en la información que el propio aparato recoge mediante sensores. La información es digitalizada y enviada a un sistema que la trata mediante algoritmos para conocer el estado del equipo y anticipar situaciones de riesgo. Normalmente está asociado a un grupo de expertos técnicos que monitorea los datos e identifica potenciales riesgos para que el cliente sólo deba preocuparse de la aplicación de las recomendaciones. El objetivo es dar el mensaje de alerta al equipo encargado de la instalación y las opciones que tienen a su disposición para evaluarlas y llevarlas a cabo con antelación a un fallo potencial. (Gordo, 2018, p. 1)

#### **7.1.3.2. Mantenimiento preventivo**

La siguiente definición se adapta a los propósitos de esta investigación, por lo que un sistema eléctrico debe contar con un plan preventivo.

Está basado en el tiempo y uso de los equipos sin esperar a que éstos fallen. Se caracteriza por evitar paradas no programadas. Conlleva la sustitución proactiva de componentes por su uso (aunque no sea necesario). Aumenta la vida de los equipos y mantiene los estándares de seguridad. El alcance puede ir de básico a exclusivo en función de la criticidad y la periodicidad de la preservación. Esta protección alarga la vida de los equipos, minimiza el riesgo de paradas no programadas y de averías, por lo que acaba suponiendo costos inferiores al correctivo. (Gordo, 2018, p. 1)

#### **7.1.3.3. Mantenimiento correctivo**

La siguiente definición se adapta a los propósitos de esta investigación, por lo que un sistema eléctrico debe contar con un plan correctivo.

Se caracteriza por esperar a que se produzca la falla de un componente o sistema. Reparación de un equipo sin atender las causas de su descompostura. No constituye un plan de servicios, por lo que no hay compromiso por parte del proveedor para dar prioridad a esta intervención. Sólo debería tenerse en cuenta en aquellos equipos sin criticidad y de poco valor, sin impacto en las operaciones ni que comprometan la seguridad. Los costos pueden ser bajos, pero el riesgo de pérdidas importantes que puedan afectar a la empresa es alto. (Gordo, 2018, p. 1)

## **7.2. Condiciones climáticas**

El clima de Guatemala está directamente relacionado a su posición geográfica, su topografía, la circulación general de la atmósfera y a la influencia

del océano. En esta investigación únicamente se tratarán aquellos conceptos que son útiles para explicar la problemática planteada.

Como definición de clima se tiene lo siguiente:

El clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del estado del tiempo, durante un periodo de tiempo y un lugar o región dados, y controlado por los denominados factores forzantes, factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del denominado sistema climático. (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, 2019, p. 58)

### **7.2.1. Elementos del clima**

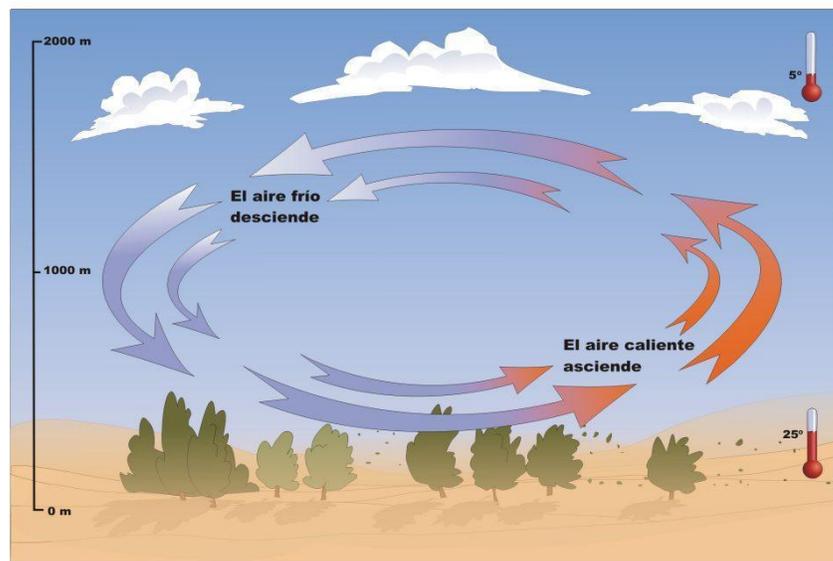
Del párrafo anterior se puede decir que “debido a que el clima se relaciona generalmente con las condiciones predominantes en la atmósfera, este se describe a partir de variables atmosféricas como la temperatura y la precipitación, denominados elementos climáticos”. (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, 2019, p. 28)

#### **7.2.1.1. Viento y temperatura**

El viento en Guatemala es uno de los factores climáticos que se han tomado en cuenta para esta investigación. La formación de las corrientes de viento afecta los distintos puntos geográficos dónde tiene cobertura la empresa encargada de los circuitos de media tensión. Las corrientes de viento se forman por lo siguiente:

El viento consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra. Existen diversas causas que pueden provocar la existencia del viento, pero normalmente se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura. (Ministerio de educación pública, 2014, p. 20)

Figura 8. **Formación de viento**



Fuente: Mágica naturaleza (2021). *Cómo se forma el viento*. Consultado 28 de marzo de 2022.

Recuperado de <https://magicanaturaleza.com/c-vientos/como-se-forma-el-viento/>.

En Guatemala los vientos pueden alcanzar velocidades de hasta más de 60 km/h en las regiones de la costa, por lo que, las redes de distribución deben de ser capaces de soportar estos vientos y tener libranza con objetos en cercanías para evitar corto circuitos.

### 7.2.1.2. Lluvia y humedad

Puede parecer que la lluvia no origina alguna interrupción en las líneas que llevan el suministro eléctrico de media tensión, sin embargo, una lluvia fuerte podría afectar el terreno dónde se instala una estructura, provocando su desplome. Normalmente en la época de invierno, la lluvia viene acompañada de vientos. Esta combinación es la mayor causante de discontinuidad en el suministro de electricidad.

Figura 9. **Ciclo del agua**



Fuente: Climate Science. (2021). *El ciclo del agua*. Consultado 28 de marzo de 2022.

Recuperado de <https://climatescience.org/es/advanced-climate-water-cycle>.

En la figura anterior se observa el ciclo del agua y como se forma la lluvia. A continuación, encontramos una definición de cómo se forman las lluvias:

Al enfriarse una masa de aire se llevan a cabo procesos de condensación o congelación que darán lugar a la aparición de gotas de agua o de pequeños cristales de hielo; estos irán creciendo y cuando alcancen el

tamaño suficiente caerán dando lugar a la precipitación. (Andrades y Muñez, 2012, p. 49)

### **7.2.2. Factores del clima**

La ubicación geográfica de Guatemala lo ubica como un país hacia el norte del trópico, formando dos estaciones que se dividen en la época lluviosa y la época seca. Normalmente la época seca corresponde a los meses entre noviembre y abril. La época dónde se presenta la mayor cantidad de lluvia son los restantes 6 meses, que también coinciden con los meses con más interrupciones en el servicio eléctrico.

A continuación, se presenta una definición de los factores de clima:

Son aquellos agentes que modifican el comportamiento de los elementos del clima, y de acuerdo con su interacción, a su presencia e intensidad, es que determinan las características particulares de los diferentes tipos de clima que existen en el mundo. (Ministerio de educación pública, 2014, p. 2)

#### **7.2.2.1. Latitud y altitud**

Podemos decir que “la distancia existente entre cualquier punto de nuestro planeta respecto al Ecuador se llama latitud y es una distancia angular. Mientras que la altitud es la distancia vertical existente entre un punto determinado con respecto al nivel del mar” (Ministerio de Educación Pública, 2014, p. 3).

Por la posición geográfica de Guatemala, su altitud se encuentra entre los 0 m y aproximadamente los 3900 msnm. Las líneas de media tensión que llevan

el suministro eléctrico seleccionadas para esta investigación, se encuentran ubicadas a una altitud, sobre el nivel del mar, de entre 0 a 800 metros. Esta región también es conocida como la boca costa y costa sur de Guatemala.

#### **7.2.2.2. La continentalidad y corrientes marinas**

La continentalidad se refiere a “la distancia que existe entre el mar y la tierra, el mar es un regulador térmico pues se calienta y enfría más lentamente que la tierra” (Ministerio de educación pública, 2014, p. 3). En Guatemala las corrientes marinas tienen una velocidad de 0.2 a 0.4 [m/s] en la región de la costa del pacífico.

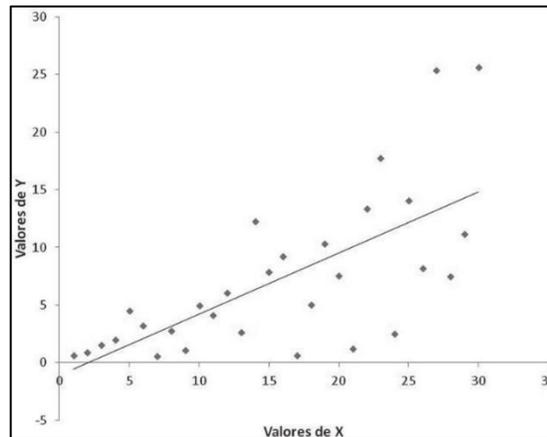
### **7.3. Modelos de regresión estadísticos**

En esta investigación se ha desarrollado un modelo estadístico que pretende describir la relación entre las variables descritas anteriormente. Por lo tanto, es necesario poder establecer las características que definen y dan respaldo teórico al modelo desarrollado.

#### **7.3.1. Definición**

En el caso de los modelos de regresión estadísticos podemos decir que, “la modelación del efecto que produce un conjunto dado de variables explicativas  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$  en una variable respuesta o dependiente  $y$ , que es de interés primario” (Toalombo Rojos, 2021, p. 5). En la siguiente figura se observa la representación gráfica de la relación lineal de una variable explicativa y una variable respuesta:

Figura 10. **Regresión lineal de Y en X**



Fuente: Researchgate. (2016). *Regresión lineal de Y en X*. Consultado 28 de marzo de 2022.  
Recuperado de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Regresion-lineal-de-Y-en-X-Regresion-lineal-multiple-El-modelo-de-regresion\\_fig1\\_295098377](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Regresion-lineal-de-Y-en-X-Regresion-lineal-multiple-El-modelo-de-regresion_fig1_295098377)

En la figura anterior, la línea recta continua es la recta de regresión de los puntos dispersos graficados. La ecuación de esa recta es utilizada para determinar la relación que pudiera existir en la serie de datos bajo análisis. Es importante notar que existe una desviación respecto a los valores originales en cada medición calculada. Esta desviación debe ser determinada para que los resultados sean válidos.

Otra definición para los modelos de regresión es la siguiente:

El concepto de análisis de regresión se refiere a encontrar la mejor relación entre Y y X, cuantificando la fuerza de esa relación, y empleando métodos que permitan predecir los valores de la respuesta dados los valores del regresor x. (Walpole, et al., 2012, p. 390)

De lo anterior se puede decir que este tipo de análisis estadístico permite relacionar dos variables o más, con el objetivo de dar una explicación de si existe o no algún grado de dependencia en los datos estudiados en un periodo específico de tiempo.

### **7.3.2. Tipos de modelo de regresión**

Lo anterior nos indica que para un fenómeno determinado existen factores que están relacionados con la causa que lo origina. Esta relación puede ser representada matemáticamente como una función con variables independientes y variables dependientes.

#### **7.3.2.1. Regresión lineal simple**

Podemos decir que, “el tipo de modelo de regresión más comúnmente conocido es la regresión lineal simple, la cual contempla la existencia de una sola variable explicativa o regresores” (Toalombo Rojos, 2021, p. 6).

La ecuación que se utiliza para este tipo de regresión es la siguiente:

$$Y = a + bX \tag{1}$$

Dónde:

- a representa la posición de la recta dónde se corta el eje Y.
- b representa la pendiente de la recta.
- X es la variable explicativa.
- Y es la resultante del fenómeno explicativo.

### 7.3.2.2. Regresión lineal múltiple

Este modelo de regresión involucra más variables “se pueden usar simultáneamente varias variables independientes (o elementos de predicción). Con el uso de más de una variable independiente, se debe hacer un mejor trabajo de explicar la variación y en consecuencia hacer predicciones más precisas” (Mendenhall et ál., 2010, p. 552).

La ecuación que se utiliza para este tipo de regresión es la siguiente:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n \quad (2)$$

Dónde:

- $a$  representa una constante.
- $b_n$  representa los coeficientes de la ecuación.
- $X_n$  representa a las variables explicativas.
- $Y$  es la resultante del fenómeno explicativo.

### 7.3.2.3. Modelo de regresión no lineal

Estos modelos “se utilizan cuando los datos no se ajustan a la recta de mejor ajuste tanto como el investigador quisiera, entonces se debe de tomar otras opciones como una relación: logarítmica, exponencial, potencial, polinomial, entre muchas más” (Carvajal, 2020, p. 12).

La ecuación que puede ser utilizada para este tipo de regresión es la siguiente:

$$Y = a + \frac{b}{X} \tag{3}$$

$$Y = a + b^X \tag{4}$$

$$Y = a + X^b \tag{5}$$

En las ecuaciones 3, 4 y 5:

- a representa una constante.
- b representa los coeficientes de la ecuación.
- X representa a las variables explicativas.
- Y es la resultante del fenómeno explicativo.

### **7.3.3. Supuesto del modelo**

Es necesario verificar la validez del modelo desarrollado. Para ello, se realiza la comprobación de los supuestos del modelo de regresión lineal. Esta comprobación se realiza para determinar si el modelo logra replicar de forma satisfactoria los valores medidos, es decir, se debe tener certeza que el modelo desarrollado explica la relación entre las variables analizadas y que reproduce valores confiables basados en pronósticos.

#### **7.3.3.1. Linealidad**

Podemos decir que, “la variable dependiente es la suma de un conjunto de elementos: el origen de la recta, una combinación lineal de variables independientes o predictoras y los residuos. El incumplimiento del supuesto de

linealidad suele denominarse error de especificación” (Pardo y Ruiz, 2005, p. 353).

La hipótesis que se evalúa es la siguiente:

- $H_0: r = 0$ , no significativo.
- $H_a: r \neq 0$ , significativo.

Asencio (2018) indica que para poder evaluar este supuesto existen las siguientes pruebas:

- Prueba de significancia del coeficiente de correlación. Se utiliza el estadístico de prueba T-Student.
- Prueba del intervalo de confianza del coeficiente de correlación de Pearson. Se utiliza el estadístico de prueba de Transformación de Ronald Fisher.

### **7.3.3.2. Normalidad**

Este supuesto es uno de los más importantes al momento de realizar este tipo de análisis en los datos, puesto que, de no cumplirse, se pierde validez en el modelo que se ha desarrollado. Además, “para cada valor de la variable independiente (o combinación de valores de las variables independientes), los residuos se distribuyen normalmente con media cero” (Pardo y Ruiz, 2005, p. 353).

Asencio (2018) explica que la hipótesis que se evalúa es la siguiente:

- $H_0$ : Los datos siguen una distribución normal.

- Ha: Los datos no siguen una distribución normal. (p. 12)

Para poder evaluar este supuesto existen las siguientes pruebas:

- Gráfico de Q – Q plot.
- Prueba de Shapiro-Wilk para muestras menores a 50 datos.
- Pruebas de Kolmogórov-Smirnov para muestras mayores a 50 datos.

### **7.3.3.3. Independencia**

Para esta comprobación se estudian los residuos y se espera que no exista un patrón definido. Por lo tanto, para dar cumplimiento a este supuesto se debe cumplir que “los residuos son independientes entre sí, es decir, los residuos constituyen una variable aleatoria” (Pardo y Ruiz, 2005, p. 353).

La hipótesis que se evalúa es la siguiente:

- Ho: Existe independencia entre los datos analizados.
- Ha: No existe independencia entre los datos analizados.

Para poder evaluar este supuesto existen las siguientes pruebas:

- Gráfico de residuos y predichos.
- Gráfico de correlograma.
- Pruebas de rachas.

#### **7.3.3.4. Homocedasticidad**

Para esta comprobación se realiza un análisis de las varianzas. Podemos decir que, “para cada valor de la variable independiente (o combinación de valores de variables independientes), la varianza de los residuos es constante” (Pardo y Ruiz, 2005, p. 353).

Asencio (2018) indica que la hipótesis que se evalúa es la siguiente:

- “Ho: No existe diferencia significativa entre las varianzas de los datos.
- Ha: Existe diferencia significativa entre las varianzas de los datos”. (p. 13)

Para poder evaluar este supuesto existen las siguientes pruebas:

- Prueba F de Snedecor.
- Prueba de residuos estandarizados.

#### **7.3.3.5. Homogeneidad**

Para esta comprobación se lleva a cabo un estudio de los errores en los datos. Podemos decir que “la homogeneidad descansa sobre la hipótesis de que el valor promedio o esperado de los errores debe ser igual o aproximadamente cero” (Asencio, 2018, p. 15).

Para poder evaluar este supuesto se utiliza la prueba de correlación de los residuos utilizando el estadístico T-Student. La hipótesis que se evalúa por medio del promedio de los errores de la siguiente manera:

- $H_0: \underline{\mu} \approx 0.$
- $H_a: \underline{\mu} = 0.$

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Redes eléctricas de distribución

2.1.1. Elementos de la red de distribución

2.1.1.1. Subestaciones eléctricas de distribución

2.1.1.2. Re-conector de cabecera

2.1.1.3. Re-conector de línea

2.1.2. Fallas en las redes eléctricas de distribución

2.1.2.1. Originadas por fuentes externas

2.1.2.2. Originadas por fuentes internas

2.1.2.3. Caracterización eléctrica de las fallas

2.1.3. Mantenimiento en redes eléctricas de distribución

2.1.3.1. Mantenimiento predictivo

- 2.1.3.2. Mantenimiento preventivo
    - 2.1.3.3. Mantenimiento correctivo
  - 2.2. Condiciones climáticas
    - 2.2.1. Elementos del clima
      - 2.2.1.1. Viento y temperatura
      - 2.2.1.2. Lluvia y humedad
    - 2.2.2. Factores del clima
      - 2.2.2.1. Latitud y altitud
      - 2.2.2.2. La continentalidad y corrientes marinas
  - 2.3. Modelos estadísticos de regresión
    - 2.3.1. Definición
    - 2.3.2. Tipos de modelo de regresión
      - 2.3.2.1. Lineal
      - 2.3.2.2. Lineal múltiple
      - 2.3.2.3. No lineal
    - 2.3.3. Supuesto del modelo de regresión
      - 2.3.3.1. Normalidad
      - 2.3.3.2. Homogeneidad
      - 2.3.3.3. Homocedasticidad
      - 2.3.3.4. Linealidad
- 3. DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO
  - 3.1. Modelo de regresión seleccionado
  - 3.2. Base de datos
    - 3.2.1. Registro de fallas en la red de distribución
    - 3.2.2. Registro de precipitación
    - 3.2.3. Registro de velocidad de viento
  - 3.3. Modelo propuesto
    - 3.3.1. Comprobación de supuestos

- 3.3.2. Normalidad
- 3.3.3. Homogeneidad
- 3.3.4. Homocedasticidad
- 3.3.5. Linealidad

#### 4. PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO

- 4.1. Utilización del modelo para dimensionar fallas
- 4.2. Dimensionamiento de cuadrillas
- 4.3. Descripción del proceso
- 4.4. Análisis técnico económico

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS



## **9. METODOLOGÍA**

La metodología utilizada en esta investigación se explica a continuación:

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

Para esta investigación se utiliza un método hipotético-deductivo, es decir, los datos que se analizan provienen de los registros hechos por personas en campo de las observaciones de las fallas en la red de distribución y las condiciones climáticas, esto da origen a desarrollar una hipótesis en la que se plantea una correlación entre las condiciones climáticas, como el viento y la lluvia, y las fallas en la red de distribución que ocurren durante la presencia de esa condición, luego de esto, se plantea un modelo que pudiera explicar el comportamiento antes mencionado y se le da validez realizando la pruebas correspondientes de los supuestos del modelo de regresión.

El diseño del estudio de esta investigación es no experimental, no se realiza manipulación de las variables analizadas, por el contrario, se realizan observaciones y se registran los datos obtenidos para ser analizados posteriormente. El tipo de estudio es de carácter mixto, es decir, que se analizan tanto variables cuantitativas, como lo es el caso de las fallas en la red de distribución y variables cualitativas en el caso de las mediciones que se realizan a las condiciones climáticas, lluvia y viento, que pueden ser consideradas como fuertes, medias o leves.

Tomando en cuenta que se ha adoptado un método hipotético-deductivo para la realización de esta investigación, podemos decir que el paradigma de

esta investigación es de carácter positivista, por lo tanto, se busca explicar la relación entre las variables en análisis que tienen una relación de dependencia-independencia.

Finalmente, el estudio realizado en esta investigación tiene un alcance de tipo descriptivo. Los datos obtenidos de fallas en la red de distribución y los datos obtenidos de velocidad de viento y cantidad de lluvia son analizados utilizando herramientas estadísticas.

## **9.2. Unidades de análisis**

Para esta investigación se ha estudiado las incidencias de fallas en la red de distribución con un voltaje de 13.8 kV, media tensión, que a su vez ha sido dividido por el tipo de causa que los originó. Por lo tanto, las causas que se analizan son las relacionadas a las condiciones climáticas, fuertes lluvias y vientos. Estas incidencias están medidas de forma cuantitativa utilizando variables discretas en valores absolutos. Estos registros son obtenidos por los equipos tele controlados instalados en la red de distribución.

Así mismo, esta investigación contempla el análisis de las velocidades de viento, registrado en metros por segundo [m/s], y la cantidad de lluvia registrada en milímetros, [mm], en un periodo determinado y registrados por equipos de medición utilizados para registrar las condiciones climáticas.

## **9.3. Variables**

Se describen a continuación:

- Fallas en la red de distribución: es una condición anormal de operación donde el suministro es interrumpido por alguna causa externa o interna. Puede darse en una fase, dos fases, o las tres fases de forma simultánea. La apertura de un equipo instalado en la red de distribución por falla es detectada por un sistema SCADA y luego se registra en una base de datos. Se le asigna un número correlativo, discreto y absoluto.
- Condiciones climáticas, velocidad de viento: consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra. Se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura. Para registrarlo se utiliza un anemómetro por un periodo determinado y las unidades son metros por segundo [m/s].
- Condiciones climáticas, cantidad de lluvia: se origina cuando una masa de aire se enfría y se condensa, formando gotas de lluvia. Cuando las gotas formadas crecen lo suficiente, caen en forma de lluvia. Se registra utilizando un pluviómetro. Las unidades en las que se registra son en milímetros [mm].

#### **9.4. Fases del estudio**

El presente trabajo de investigación sigue un proceso que tiene un orden lógico que permite dar respuesta a las preguntas planteadas en la sección de descripción del problema. Este proceso se divide en fases que se describen a continuación:

#### 9.4.1. Fase 1: registro y análisis de información

En esta fase se realiza una recopilación de datos relacionados a las fallas en la red de distribución, la velocidad de viento y la cantidad de lluvia. Esta información es guardada en una base de datos.

La información recopilada para las fallas en la red de media tensión es registrada por los diferentes equipos instalados en la red de distribución o bien, en la subestación de distribución. Esta información es visualizada en tiempo real por medio de un sistema SCADA. Cuando un equipo registra una apertura se genera una incidencia en una base de datos maestra, el personal de campo realiza la revisión del circuito, al localizar la falla se establece la causa que la originó.

Posteriormente se realiza una consulta a la base de datos maestra para obtener la siguiente información:

Tabla I. **Base de datos fallas en red de distribución**

<b>Número</b>	<b>Circuito</b>	<b>Equipo que registra apertura</b>	<b>Causa</b>
1	A	RC	Cond. Climáticas
2	B	RML	Cond. Climáticas
...	...	...	...
n	N	RC / RML	Cond. Climáticas

Fuente: elaboración propia.

En la tabla I, se tendrán los registros de todas las fallas en la red de distribución que fueron detectadas por el sistema SCADA en el periodo de tiempo en análisis. Esta tabla será modificada de tal forma que muestre los registros mensuales de las fallas en la red de distribución tal como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla II. **Fallas mensuales en la red de distribución**

<b>Número</b>	<b>Mes</b>	<b>Fallas en la red de distribución</b>
1	Enero	22
2	Febrero	56
...	...	...
12	Diciembre	15

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, la tabla II tendrá la información condensada de las fallas en la red de distribución, bajo el entendido que únicamente son fallas con causa de condiciones climáticas, fuertes lluvia o viento.

La información recopilada por los anemómetros del INSIVUMEH, instalados en la región de occidente, de velocidad de viento en [m/s] se registra de forma mensual con los valores promedio y es almacenada en la siguiente tabla:

Tabla III. **Velocidad promedio mensual de viento**

<b>Número</b>	<b>Mes</b>	<b>Velocidad promedio de viento en [m/s]</b>
1	Enero	2.3
2	Febrero	1.6
...	...	...
12	Diciembre	3.4

Fuente: elaboración propia.

La información recopilada por los pluviómetros de la cantidad de lluvia en [mm] se registra de forma mensual con los valores promedio y son almacenados en la siguiente tabla:

Tabla IV. **Cantidad mensual de lluvia registrada**

<b>Número</b>	<b>Mes</b>	<b>Cantidad de lluvia en [mm]</b>
1	Enero	1.4
2	Febrero	1.2
...	...	...
12	Diciembre	3.2

Fuente: elaboración propia.

La información registrada en las tablas anteriores es analizada utilizando técnicas estadísticas de correlación de variables.

Luego de establecer el modelo de regresión que describa el comportamiento de los datos en análisis, se aplicarán las pruebas

correspondientes a los supuestos del modelo de regresión para darle validez estadística.

La base de datos utilizada en esta investigación registra los datos de las fallas en la red de distribución con causal de condiciones climáticas, fuertes lluvias o viento y los datos de velocidad de viento y cantidad de lluvia.

Tabla V. **Base de datos de la investigación**

<b>Número</b>	<b>Mes</b>	<b>Fallas en la red de distribución</b>	<b>Velocidad promedio de viento [m/s]</b>	<b>Cantidad de lluvia [mm]</b>
1	Enero	22	2.3	1.4
2	Febrero	56	1.6	1.2
...	...	...	...	...
12	Diciembre	15	3.4	3.2

Fuente: elaboración propia.

#### **9.4.2. Fase 2: análisis de fallas y viento**

Durante el desarrollo de esta fase se realiza un análisis estadístico para validar la correlación que pudiera existir entre las variables de fallas en la red de distribución y la velocidad de viento.

La información es recopilada y luego registrada en la tabla siguiente:

Tabla VI. **Base de datos de fallas y viento**

<b>Número</b>	<b>Mes</b>	<b>Fallas en la red de distribución</b>	<b>Velocidad promedio de viento [m/s]</b>
1	Enero	22	2.3
2	Febrero	56	1.6
...	...	...	...
12	Diciembre	15	3.4

Fuente: elaboración propia.

### **9.4.3. Fase 3: análisis de fallas y la lluvia**

Durante el desarrollo de esta fase se realiza un análisis estadístico para validar la correlación entre las variables de fallas en la red de distribución y la cantidad de lluvia. La información es recopilada y luego registrada en la tabla siguiente:

Tabla VII. **Base de datos de fallas y cantidad de lluvia**

<b>Número</b>	<b>Mes</b>	<b>Fallas en la red de distribución</b>	<b>Cantidad de lluvia en milímetros [mm]</b>
1	Enero	22	1.4
2	Febrero	56	1.2
...	...	...	...
12	Diciembre	15	3.2

Fuente: elaboración propia.

#### **9.4.4. Fase 4: propuesta de mantenimiento**

Finalmente, en esta fase se desarrolla un modelo de plan de mantenimiento preventivo basado en los resultados obtenidos por el modelo de regresión lineal desarrollado en las fases anteriores.

Se realiza de la siguiente forma:

- Utilizando el modelo desarrollado, se establece una cantidad esperada de falla en la red de distribución para un periodo determinado. Para esto, se introducen valores del pronóstico del clima en el modelo desarrollado. El resultado es entonces, las fallas en la red de distribución basado en el pronóstico del clima utilizado.
- Se establece un presupuesto basado en los resultados del modelo utilizado. Esto permite el uso eficiente de los recursos de la empresa y permite establecer un parámetro de la cantidad de recursos disponibles para el personal de campo necesario para realizar las actividades.
- El personal de campo realiza una inspección visual de la red de distribución dónde se espera que ocurra la mayor cantidad de fallas, esto se realiza basado en los resultados del modelo desarrollado.
- Se reporta a la jefatura de mantenimiento los hallazgos que el personal de campo localizó en la inspección visual del segmento de red de distribución asignado.

- Tomando en cuenta la cantidad de recursos económicos disponibles para garantizar que sean optimizados, se programan y se llevan a cabo los trabajos que son necesarios para prevenir una posible falla en la red de distribución.
- El personal de campo reporta a la jefatura de mantenimiento que los trabajos fueron realizados e inspeccionados para que garantizar que fueron realizados cumpliendo con la normativa vigente.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para analizar la información registrada en la base de datos representada en la tabla 5 de la sección anterior, se utilizarán las técnicas de estadística descriptiva e inferencial. Esto permitirá conocer el comportamiento de los datos en el tiempo y permitirá establecer si existe una relación entre las variables.

Para esto, se ha establecido las variables independientes y variables dependientes. Siguiendo el modelo de la ecuación (2) utilizado para desarrollar una regresión lineal múltiple tenemos lo siguiente:

$$Y(X_1, X_2) = a + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (6)$$

Dónde:

- Y, es la variable dependiente. Para esta investigación, representa las fallas en la red de distribución con causal de condiciones climáticas, fuertes lluvias o vientos.
- $X_1$ , es la primera variable independiente. Para esta investigación, representa la velocidad promedio del viento en [m/s], registrada en el periodo en análisis.
- $X_2$ , es la segunda variable independiente. Para esta investigación, representa el promedio mensual de lluvia en [mm] que fue registrada en el periodo analizado.

- $b_1$  y  $b_2$ , son los coeficientes del modelo de regresión lineal múltiple y serán calculados en esta investigación.
- $a$ , representa el valor de un número constante.

Además, se realizará una matriz de correlación para determinar la relación entre cada variable. Para realizar esto, se utilizará el coeficiente de correlación ( $r$ ) de Pearson, el cual indica la intensidad de relación existente entre las variables y tiene valores entre -1 y 1. Luego de esto, se realizará el cálculo de los coeficientes  $b_1$  y  $b_2$ . Esto nos permitirá conocer todos los parámetros de la ecuación que permitirá explicar el comportamiento de los datos en análisis.

Luego de establecer los coeficientes y el modelo a utilizar, se realizará el contraste global del modelo de regresión o análisis de varianza. Esto permitirá definir si el modelo presentado cuenta con significancia estadística para poder explicar el comportamiento de los datos en un contraste global.

Lo anterior será determinado por la utilización del estadístico  $F$ , comparando un valor teórico y valor calculado, con la siguiente hipótesis:

- $H_0: b_1 = b_2 = \dots = b_n = 0.$
- $H_a: b_n \neq 0.$

Para determinar qué hipótesis aceptar y cuál rechazar, se debe utilizar el siguiente criterio:

- Si  $F_t < F_c$ , podemos aceptar la  $H_0$ , lo que significa que en el modelo de regresión desarrollado existe significancia estadística.

- Si  $F_t > F_c$ , podemos rechazar la  $H_0$ , lo que significa que en el modelo de regresión desarrollado si existe significancia estadística.

Luego de lo anterior, se realizará el ajuste del modelo de regresión lineal múltiple calculando el coeficiente de determinación múltiple,  $R^2$ . Esto permitirá conocer la proporción de la variabilidad que puede ser explicada con el modelo desarrollado. También se calculará el error estándar para determinar la medida de dispersión que presenta el modelo desarrollado.

Finalmente, se realizará la comprobación de los supuestos del modelo de regresión de la siguiente forma:

- Comprobación del supuesto de normalidad: Se utilizará la prueba de Shapiro-Wilk debido a que se analizarán menos de 50 valores. Se realizará la comparación de un valor teórico y un valor calculado del estadístico de prueba  $W$ .
- Comprobación del supuesto de independencia: Se realizará la prueba de rachas, calculando los residuos entre los datos calculados y los datos teóricos en análisis. De ser necesario se realizará la prueba gráfica por medio del gráfico de correlograma para tener una segunda opinión del cumplimiento de este supuesto.
- Comprobación del supuesto de homogeneidad: se realizará la comparación de un valor teórico y de un valor calculado del estadístico de prueba  $T$  de Student. Y se validará el resultado según la hipótesis y criterio de cumplimiento antes expuesto.

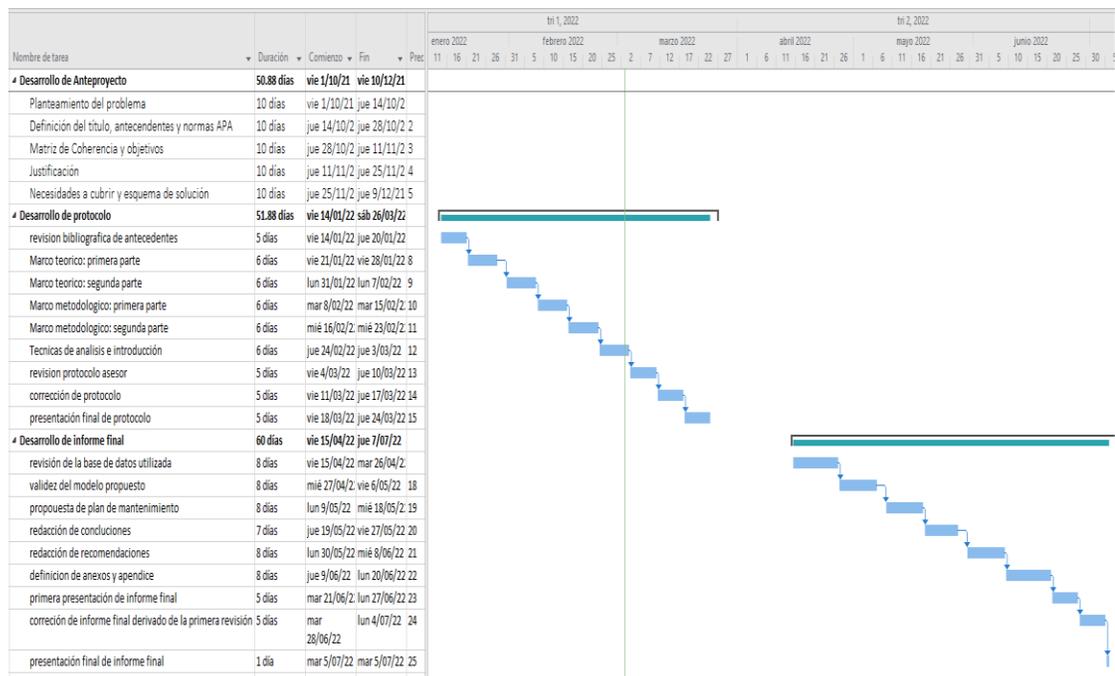
- Comprobación del supuesto de homocedasticidad: Se realizará la prueba con el estadístico F de Snedecor, comparando un valor teórico con un valor calculado. Se utilizará la hipótesis y criterio de cumplimiento del supuesto antes explicado.

La comprobación de los supuestos del modelo de regresión lineal múltiple dará la validez estadística necesaria al modelo presentado para explicar el comportamiento de los datos analizados en esta investigación. Esto permitirá obtener resultados que pueden ser utilizados como parámetro de medición para desarrollar un plan de mantenimiento preventivo en la red de distribución, optimizando los recursos disponibles y garantizando que la red de distribución sea más estable brindando un servicio de calidad.

## 11. CRONOGRAMA

A continuación, podemos encontrar el detalle de las actividades realizadas para el desarrollo de esta investigación y el tiempo que se estimó para la realización.

Figura 11. Cronograma



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Office Project Profesional 2021.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

En la siguiente tabla se puede observar la forma en que se dividen los recursos que son considerados como necesarios para llevar a cabo el estudio planteado de principio a fin:

Tabla VIII. Recursos para la investigación

Recurso necesario para la investigación		SI	NO	N/A
Humano	• Investigador.	X		
	• Asesor del investigador.	X		
Tecnológicos	• Computadora.	X		
	• Software de análisis de datos.	X		
Acceso a la información	• Información de INSIVUMEH.	X		
	• Información por parte de la empresa distribuidora de electricidad.	X		
Financiero	• Gastos por investigación.			X

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior refleja que se poseen los recursos para llevar a cabo esta investigación. El recurso financiero no aplica dentro de esta investigación debido a que no es necesario incurrir en gasto para su realización. Por lo tanto, y considerando que se poseen los recursos necesarios, se puede decir que es factible realizar esta investigación.



### 13. REFERENCIAS

1. Andrades, M. y Muñoz, C. (2012). *Fundamentos de climatología*. España: Universidad de La Rioja. Recuperado de <https://archive.org/details/2013FundamentosDeClimatologia/page/n4/mode/1up>
2. Asencio, A. (2018). *Modelo de regresión lineal aplicado a la cantidad de contenedores a movilizar en puerto Santo Tomás de Castilla, Guatemala* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/9445/>.
3. Bautista, L. (2018). *Identificación de 11 tipos de fallas en líneas de transmisión de alta tensión utilizando redes neuronales* (Tesis de licenciatura). Universidad de Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/12670>.
4. Camacho, R. M. (2017). *Localización de fallas en redes de distribución eléctrica por sensado comprimido (Compressive sensing)* (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13585>.

5. Carvajal, L. (18 de marzo de 2020). Modelos no lineales. Modelo de regresión polinomial y por segmentos [Mensaje en un blog]. <https://www.grupodabia.com/post/2020-03-18-modelos-no-lineales/>.
6. Coro, M. y Tipán, J. (2021). *Diseño de una herramienta informática para el dimensionamiento de elementos de patio de subestaciones eléctricas* (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7848>.
7. Fiaschetti, L. (2021). *Sistema de gestión y localización de fallas en redes de distribución de energía con aplicación en el ámbito regional* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional del Centro de La Provincia de Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://www.ridaa.unicen.edu.ar/xmlui/handle/123456789/2618>.
8. García, S. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid, España: Diaz de Santos, S.A.
9. Gómez, V., Peña, R., y Hernández, C. (noviembre, 2012). Identificación y localización de fallas en sistemas de distribución con medidores de calidad del servicio de energía eléctrica, *Información tecnológica*, 23(2), 109-116. Recuperado de <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v23n2/art13.pdf>.

10. Gordo, J. (26 de julio de 2018). ¿Cuál es la mejor forma de mantener un sistema eléctrico? [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://e-management.mx/2018/07/26/cual-es-la-mejor-forma-de-mantener-un-sistema-electrico/>.
11. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (2019). *Tiempo y Clima*. Colombia: Autor. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
12. Leyton, L. (2018). *Plan de mantenimiento predictivo del sistema de vapor para reducción de pérdidas de hogazas en la línea de producción de panes - panificadora BIMBO S.A.* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Callao, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/5201>.
13. Mendenhall, W., Beaver, R. y Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Mexico: CENAGE Learning. Recuperado de <https://www.fcfm.buap.mx/jzacarias/cursos/estad2/libros/book5e2.pdf>.
14. Ministerio de educación pública. (2014). *Elementos y factores de clima*. Costa Rica: Autor. Recuperado de [https://www.mep.go.cr/sites/default/files/recursos/recursos-interactivos/clima\\_tiempo/pdf/elementos\\_y\\_factores\\_del\\_clima.pdf](https://www.mep.go.cr/sites/default/files/recursos/recursos-interactivos/clima_tiempo/pdf/elementos_y_factores_del_clima.pdf).

15. Morales, G., Mora, J. y Vargas, H. (mayo, 2007). Método de localización de fallas en sistemas de distribución basado en gráficas de reactancia. *Scientia et Technica*, 1(34). Recuperado de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5517/3173>
16. Pabón, F. A. (2016). *Diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de distribución mediante la transformada de Wavelet* (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13104>.
17. Pardo, A. y Ruiz, M. (2005). *Análisis de datos con SPSS 13 base*. España: McGraw-Hill. Recuperado de [https://www.academia.edu/39339521/An%C3%A1lisis\\_de\\_datos\\_con\\_SPSS\\_13\\_Base\\_Antonio\\_Pardo\\_Merino\\_1ED](https://www.academia.edu/39339521/An%C3%A1lisis_de_datos_con_SPSS_13_Base_Antonio_Pardo_Merino_1ED).
18. Pico, L. y Rodríguez, E. (2015). *Caracterización de fallas más recurrentes en líneas de media tensión utilizando Wavelets* (Tesis de licenciatura). Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/4677>.
19. Rincon, M. (2019). *Modelo estadístico para la predicción de fallas potenciales en redes eléctricas de distribución* (Tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. <https://repositorio.utp.edu.co/items/6b72cbf8-982d-4499-a415-49b5930c317f>

20. Rodríguez, J. (2020). *Instalaciones de distribución*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A. Recuperado de <https://www.paraninfo.es/catalogo/9788428338615/instalaciones-de-distribucion--edicion-2020->.
21. Sector Electricidad. (2017). *Reconectores*. Lima, Perú: Autor. Recuperado de <https://www.sectorelectricidad.com/19183/reconectores/>.
22. Toalombo, B. (2021). *Estudio de los modelos de regresión paramétricos polinomiales y modelos de regresión no paramétricos B-Splines. Aplicaciones en ingeniería*. (Tesis de maestría). Universidad técnica de Ambato, Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/33202>.
23. Walpole, R., Myers, R., Myers, S. y Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Mexico: Pearson educación.
24. Yebra, J. (2009). *Sistemas eléctricos de distribución*. Barcelona, España: Reverte. Recuperado de <https://bibliotecaduitama.files.wordpress.com/2011/12/sistemas-electricos-de-distribucion.pdf>.