



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA Y  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE POS-GRADUACIÓN  
INTERDISCIPLINAR EN ENERGIA Y  
SUSTENTABILIDAD**

**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN  
ELÉCTRICO REAL**

**Amina Ahmed Coronel**

*Foz do Iguaçu - PR*

2022

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação  
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

C822a

Coronel, Amina Ahmed.

Análisis de confiabilidad de un sistema de distribución eléctrico real / Amina Ahmed Coronel. - Foz do Iguaçu, 2022.

81 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA Y TERRITÓRIO (ILATIT), PROGRAMA DE POS-GRADUACIÓN INTERDISCIPLINAR EN ENERGIA Y SUSTENTABILIDAD.

Orientador: Jorge Javier Gimenez Ledesma.

Coorientador: Oswaldo Hideo Ando Junior.

1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade. I. Ledesma, Jorge Javier Gimenez. II. Junior, Oswaldo Hideo Ando. III. Título.

CDU 62



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUCTURA Y  
TERRITORIO – (ILATIT)**

**PROGRAMA DE POS-GRADUACIÓN  
INTERDISCIPLINAR EN ENERGÍA Y  
SUSTENTABILIDAD**

## **ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN REAL**

Disertación de maestría presentada al Programa de Posgrado Interdisciplinar en Energía y Sustentabilidad de la Universidad Federal de Integración Latinoamericana, como requisito parcial para obtener el título de Maestría en Energía y Sustentabilidad.

Orientador: Jorge Javier Gimenez Ledesma.

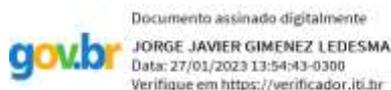
Co-orientador: Oswaldo Hideo Ando Junior.

*Foz do Iguaçu - PR  
2022*

# ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO REAL

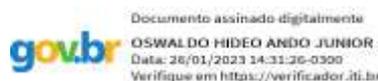
Disertación de maestría presentado al Programa de Pos Graduación en Energía y Sustentabilidad del Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, como requisito para la obtención del título de Magíster en Energía y Sustentabilidad.

## BANCA EXAMINADORA

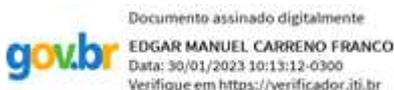


---

Orientador: Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma  
Universidad Federal de Integración Latino-Americana



Co-orientador: Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior  
Universidad Federal Rural de Pernambuco



---

Dr. Edgar Manuel Carreño Franco  
Universidad Estadual del Oeste de Paraná



---

Dra. Mauren Pomalis Coelho da Silva  
Universidad Federal Rural de Pernambuco

Firmado digitalmente por OLIVEIRA Mario Orlando  
Fecha: 2023.01.27 16:56:12-03'00'

---

Dr. Mario Orlando Oliveira  
Universidad Nacional de Misiones

## RESUMEN

La calidad del servicio eléctrico en un sistema de distribución eléctrico es un tema ampliamente tratado con el avance de la tecnología y las nuevas necesidades conectadas al sistema de distribución, este servicio se encuentra en un estado dinámico para solucionar los problemas existentes. Es por ello que las concesionarias velan por la calidad de la energía eléctrica, dentro de este concepto se encuentran los indicadores de continuidad de servicio, Frecuencia Equivalente de Potencia (FEP) y Duración Equivalente de Potencia (DEP), un valor elevado de estos indicadores afecta a la Pérdida de Energía No Facturada (PENF) revelando carencia de respuestas rápidas y efectivas de la concesionaria. Este estudio analiza el impacto de las duraciones de corte de suministro para el cálculo confiabilidad de un sistema de distribución eléctrico real, fueron analizados diez alimentadores de la Administración Nacional de Electricidad, perteneciente a la subestación Alto Paraná, localizada en Ciudad del Este – Paraguay, mediante los Métodos: de Indicadores obtenidos de los índices IEEE 1366 y *Weibull*. Con el objetivo de aumentar el análisis del tema abordado se proyecta la predicción de la duración aproximada de los cortes de suministros mediante métodos estadísticos como el Método T – *Student* el de Regresión Lineal Simple. Para ello se recolectan los datos de los indicadores de los años 2020 y 2021. El estudio de confiabilidad indicó una diferencia de hasta el 31 % entre el Método de Índices de IEEE 1366 y el Método de *Weibull*. También, el trabajo proyecta una estimación del valor de los cortes de suministro prediciendo a través del método de T de *Student* si los valores para el 2022 aumentarían el 20% o el doble del valor del año 2021, en ambos casos se rechazan la hipótesis, así mismo, se predice también a través de Método de Regresión Lineal Simple los valores del corte de suministro para los años 2022, 2023 y 2024.

**Palabras claves:** indicadores de continuidad de servicio, calidad de energía eléctrica, sistema eléctrico de distribución, método de *Weibull*, método de Índices IEEE 1366.

## ABSTRACT

The quality of the electrical service in an electrical distribution system is a subject widely treated with the advancement of technology and the new needs connected to the distribution system, this service is in a dynamic state to solve existing problems. That is why the concessionaires ensure the quality of electrical energy, within this concept are the indicators of continuity of service, Equivalent Frequency of Power (FEP) and Equivalent Duration of Power (DEP), a high value of these indicators affects the Uninvoiced Loss of Energy revealing a lack of quick and effective responses from the concessionaire. This study analyzes the impact of supply cut durations for calculating reliability of a real electrical distribution system, ten feeders of the National Electricity Administration, belonging to the Alto Paraná substation, located in Ciudad del Este - Paraguay, were analyzed. through the Methods: Indicators obtained from the IEEE 1366 and Weibull indices. In order to increase the analysis of the topic addressed, the prediction of the approximate duration of supply cuts is projected using statistical methods such as the T - Student Method and Simple Linear Regression. For this, the data of the indicators for the years 2020 and 2021 are collected. The reliability study indicated a difference of up to 31% between the IEEE 1366 Index Method and the Weibull Method. Also, the work projects an estimate of the value of the supply cuts, predicting through the Student's T method if the values for 2022 would increase 20% or double the value of the year 2021, in both cases the hypothesis is rejected, Likewise, the values of the supply cut for the years 2022, 2023 and 2024 are also predicted through the Simple Linear Regression Method.

**Keywords:** service continuity indicators, electric power quality, electric distribution system, Weibull method, IEEE 1366 Index method.

## RESUMO

A qualidade do serviço elétrico em um sistema elétrico de distribuição é um assunto amplamente tratado com o avanço da tecnologia e as novas necessidades ligadas ao sistema de distribuição, este serviço encontra-se em um estado dinâmico para solucionar os problemas existentes. Por isso as concessionárias procuram garantir a qualidade da energia elétrica, dentro deste conceito estão os indicadores de continuidade de serviço, Frequência Equivalente de Potência (FEP) e Duração Equivalente de Potência (DEP), um alto valor destes indicadores afeta a Perda Não Faturada de Energia (PENF) revelando falta de respostas rápidas e eficazes por parte da concessionária. Este estudo analisa o impacto das durações dos cortes de fornecimento para o cálculo da confiabilidade de um sistema de distribuição elétrica real, foram analisados dez alimentadores da Administração Nacional de Eletricidade, pertencentes à subestação Alto Paraná, localizada em Ciudad del Este - Paraguai, através dos Métodos: Indicadores obtidos a partir dos índices IEEE 1366 e Weibull. A fim de aumentar a análise do tema abordado, a previsão da duração aproximada dos cortes de energia elétrica é projetada usando métodos estatísticos como o Método T - Student e Regressão Linear Simples. Para isso, são coletados os dados dos indicadores dos anos de 2020 e 2021. O estudo de confiabilidade indicou uma diferença de até 31% entre os métodos de Índice IEEE 1366 e o Weibull. Ainda, o trabalho projeta uma estimativa do valor dos cortes através do método T de Student, se os valores para 2022 aumentariam 20% ou dobrariam o valor do ano de 2021, em ambos os casos a hipótese é rejeitada, da mesma forma, os valores de duração do corte de fornecimento para os anos de 2022, 2023 e 2024 através do Método de Regressão Linear Simples.

**Palavras-chave:** indicadores de continuidade de serviço, qualidade de energia elétrica, sistema de distribuição elétrica, método Weibull, método IEEE 1366.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplo de diagrama sistema de distribución.....	30
Figura 2: Momento de una sobretensión. ....	31
Figura 3: Valores obtenidos de x e y. ....	38
.Figura 4:Gráfico de función de Weibull. ....	38
Figura 5: Gráfico de ubicación de coordenadas. ....	45
Figura 6: Gráfica de la función lineal. ....	45
Figura 7: Flujograma de trabajo. ....	47
Figura 8: Interfaz del programa arcview.....	48
Figura 9: Barra de alimentación y transformador. ....	51
Figura 10: Sistema de distribución. ....	52
Figura 11: Área de muestra, alimentadores de una zona urbana .....	53
Figura 12: Salida alimentador seis y ocho.....	53
Figura 13: Diagrama unifilar de la SSEE APR.....	54
Figura 14: Representación de DEP 2020/2021.....	57
Figura 15: Representación gráfica de FEP 2020/2021 .....	58
Figura 16: Representación gráfica de PENF 2020 y 2021 .....	59
Figura 17: Gráfico de función de Weibull del año 2020. ....	63
Figura 18: Diferencia gráfica entre métodos de confiabilidad. ....	66
Figura 19: Gráfico de regresión lineal simple. ....	70
Figura 20: Gráfico de duración de los años 2020, 2021, 2022, 2023, 2024.....	71
Figura 21: Ejemplo parte diaria de la SSEE APR. ....	79
Figura 22: Botón de inclusión/exclusión alimentador dos. ....	80

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Combinación booleana de las pc. ....	18
Tabla 2: Resumen por área del portafolio bibliográfico. ....	19
Tabla 3: Valores de indicadores de países. ....	22
Tabla 4: Tabla de distribución horas de fallas. ....	37
Tabla 5: Ventajas y desventajas de métodos estudiados. ....	40
Tabla 6: Características SSEE Alto Paraná. ....	49
Tabla 7: Causas corte suministro 2020 y 2021. ....	60
Tabla 8: Confiabilidad de los alimentadores. ....	61
Tabla 9: Confiabilidad de Weibull 2020 y 2021. ....	64
Tabla 10: Comparación de confiabilidad. ....	65
Tabla 11: Proyección de duración de cortes para el 2022. ....	67
Tabla 12: Duración corte de suministro año 2020. ....	80
Tabla 13: Duración corte de suministro año 2021. ....	81

**LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS**

ANDE	Administración Nacional de Eletricidad
Alim	Alimentador
Ce	Costo energia eléctrica
COD	Centro de Operación de distribución
DEC	Duración Equivalente por Unidad Consumidora
DEP	Duración Equivalente de Potencia
ENS	Energía No Servida
FEC	Frecuencia Equivalente por Unidad Consumidora
FEP	Frecuencia Equivalente de Potencia
FU	Factor de Utilización
IEC	<i>International Electro technical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
KV	Kilo Volt
KVA	Kilo Volt Ampere
MAIFI	<i>Momentary Average Interruption Frequency Index</i>
PENF	Pérdida de Energía No Facturada
PT	Pérdidas Técnicas
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
SGDE	Sistema de Gestión de Distribución Eléctrica
Sn	Potencia Nominal
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
Volt	Voltaje

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.2 JUSTIFICATIVAS Y RELEVANCIA .....	14
1.3 PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DEL TRABAJO .....	16
1.4 ESTRUCTURA DE LA DISERTACIÓN .....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18
2.1.1 Análisis De Artículos Científicos .....	20
2.1.2 Análisis De Patentes .....	25
2.2 CONCEPTOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	29
2.3 CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCION .....	30
2.3.1 Perturbaciones Asociadas A La Calidad De La Electricidad.....	31
2.3.2 Indicadores De Continuidad De Servicio .....	32
<b>3 MÉTODOS UTILIZADOS.....</b>	<b>33</b>
3.1 MÉTODOS PARA CALCULAR LA CONFIABILIDAD EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN .....	34
3.1.1 Método De Confiabilidad Basada En Índices IEEE1366.....	34
3.1.2 Método De Confiabilidad De Weibull .....	36
3.2 MÉTODOS PARA ESTIMAR DURACION DE CORTE DE SUMINISTRO.....	40
3.2.1 Método T-Student .....	40
3.2.2 Método Regresión Lineal Simple .....	44
<b>4 ESTUDIO DE CASO .....</b>	<b>47</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN REAL .....	51
4.2 MÉTRICAS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ESTUDIADO .....	55
<b>5 RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>56</b>
5.1 MÉTRICAS DE LA RED ELECTRICA DE DISTRIBUCIÓN .....	56
5.1.1 Duración Equivalente De Potencia.....	56
5.1.2 Frecuencia Equivalente De Potencia .....	57
5.1.3 Pérdida De Energía No Facturada .....	58

5.2 EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD .....	59
5.2.1 Método De Índices .....	59
5.2.2 Modelo De Weibull.....	62
5.3 PREDICCIÓN DE DURACIÓN CORTE DE SUMINISTRO .....	66
5.3.1 Predicción De Duración Corte de Suministro 2022 – T De Student .....	66
5.3.2 Predicción de Duración de Corte de Suministro por Regresión Lineal Simple .....	69
<b>6 CONCLUSIÓN .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>
<b>APÉNDICE .....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

La Calidad de Servicio dentro de un sistema de distribución eléctrica se puede cuantificar de acuerdo con parámetros de continuidad, calidad de electricidad y servicio comercial (HERRERA, 2017). En sistemas eléctricos como Brasil, los dos primeros parámetros son punibles según la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANNEL) por la Resolución Normativa N° 414 del 09/09/2009 (ANNEL, 2009). Las concesionarias del sector eléctrico buscan optimizar procesos y servicios a favor de la calidad y continuidad del servicio eléctrico, según criterios técnicos y económicos (BOSE, 2019).

El sistema eléctrico paraguayo cuenta con un monopolio estatal a cargo de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE). En el caso del sistema de distribución de energía eléctrica (23 kV) para la medición de la calidad del servicio, se apoya en los indicadores de continuidad Duración Equivalente de Potencia (DEP) y Frecuencia Equivalente de Potencia (FEP) adaptados de la Norma IEEE 1366 *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices* (ENGINEERS INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS, 2003). De la norma mencionada para DEP se utiliza el método de cálculo TTIK (Tiempo Total de Interrupción por kVA) y para FEP utilizan la fórmula de FMIK (Frecuencia Media de Interrupción por kVA). Por lo tanto, el presente trabajo aborda el tema: Confiabilidad del sistema de distribución eléctrica real de la concesionaria ANDE, correspondientes a los años 2020 y 2021.

La motivación principal del trabajo es obtener los valores de la confiabilidad de un sistema de distribución real, que consta de diez alimentadores de una subestación en la que se llevará en cuenta el tiempo transcurrido en los cortes accidentales tomados del registro diario del Centro de Operación de Distribución del Este de los años 2020 y 2021 (BROW, 2008). Para lograr, se realizará cálculos de confiabilidad mediante los métodos: Índices IEEE 1366 (LEVY y CARRASCO, 2020) y *Weibull* (BIROLINI, 2017). Posterior a ello, realizar un análisis comparativo de los valores obtenidos.

También se desea conocer el valor estimado de la duración de cortes de suministro para el año 2022 a través de los datos de cortes de suministros de años anteriores. Para ello, se proponen dos métodos de estudios: T de *Student* (MURRAY y STEPHENS, 2009) y Regresión Lineal Simple (BROW, 2008).

Para lograr lo planteado, se realizan las investigaciones en el área mediante la búsqueda referencial de los artículos más relevantes obtenidos de aplicar el *Método Proknow-C* (ENSSLIN, ENSSLIN, *et al.*, 2012) y la búsqueda de los conceptos más relevantes del tema investigado.

Para aplicar los métodos mencionados se desarrolla un método de trabajo, los pasos seguidos para obtener los resultados de los objetivos planteados, también se expone cada caso con un ejemplo didáctico para la comprensión del tema. A continuación del desarrollo metodológico se expone los resultados obtenidos de las metodologías aplicadas. Así mismo, se realiza las conclusiones principales del trabajo propuesto.

### 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es analizar la confiabilidad de un sistema de distribución eléctrico real mediante el método de Índices IEEE 1366 *Guide for Electric Power Distribution Reliability* y del método de *Weibull*, para ello, propone los siguientes objetivos específicos.

- a) Analizar los datos relacionados a la confiabilidad de un sistema de distribución eléctrico real.
- b) Realizar una búsqueda de índices de confiabilidad calculados a través de métodos que se adapten al sistema real en estudio a través del análisis indicando su forma de cálculo y definiciones.
- c) Exponer los cálculos de confiabilidad de un sistema de distribución eléctrico real comparando los métodos de cálculo: (i) Método de Índices IEEE1366 y (ii) Método de *Weibull*.
- d) Obtener la predicción de la duración de las interrupciones de energía eléctrica comparando los métodos: (i) Método *T-Student* y (ii) Regresión Lineal Simple.

### 1.2 JUSTIFICATIVAS Y RELEVANCIA

Con el fin de mejorar la continuidad de energía eléctrica, estudios como (MAYKOT, ARANHA y OLIVA, 2019) tienen como objetivo aumentar la confiabilidad de una red eléctrica, reduciendo el tiempo de interrupción del servicio eléctrico en el sistema de

distribución. La preocupación actual es que se tenga la disponibilidad de energía eléctrica el mayor tiempo posible, sin interrupciones, justificando el estudio de confiabilidad de la red eléctrica (BARBOSA, SHAYANI e GONÇALVES, 2018).

Ante la cuestión de aumentar la confiabilidad de una red, el sector eléctrico es muy dinámico y se encuentra en búsqueda de innovaciones constantemente, ya sea en tecnologías o metodologías que ayuden a tomar decisiones de planificación de la red a corto, mediano o largo plazo (HUERTA, 2006).

Asegurar un nivel de confiabilidad es uno de los desafíos de las empresas distribuidoras de energía eléctrica y mantener un nivel elevado es uno de los problemas de la ingeniería actual. Para esta disertación se considera nivel elevado de la confiabilidad valores próximos a uno o al 100%.

Es por ello que, no es posible diseñar, modificar, ampliar una red eléctrica sin un estudio previo de confiabilidad, su cálculo debe realizarse si es posible de forma anual como se demuestra en este trabajo, estudiando y comparando métodos para el cálculo de confiabilidad de una red eléctrica que puede realizarse de forma escalada o en cualquier otro sistema eléctrico de distribución. Porque, no se puede invertir en una red sin conocer el verdadero problema de una baja confiabilidad (BROW, 2008). Estos eventos podrían ser muchos más costosos que los elementos que lo causaron (BIROLINI, 2017). Por ejemplo, se invierte en un tramo determinado sin estudio previo de confiabilidad, pero la red en cuestión a pesar de la inversión continua con un bajo porcentaje de confiabilidad, esto es, porque no se realizó el estudio de las causas exactas de dichos valores que pueden ser ambientales o inclusive a la falta de poda de árboles, las ramas en contacto con los conductores de distribución accionan los sistemas de protección.

Analizar la confiabilidad de una red eléctrica y conocer los valores permite: (i) mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico, (ii) mayor eficiencia en sus procesos operativos y (iii) extender la vida útil de los activos de distribución (BROW, 2008). Además, es importante predecir los valores aproximados de la duración de las interrupciones, que es la causa principal de que un sistema sea o no confiable, conocer, estimar o predecir dichos valores conllevan a estimar la pérdida económica de las concesionarias.

### 1.3 PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DEL TRABAJO

La importancia del estudio de confiabilidad en los sistemas de distribución se deriva de las pérdidas, cuando existen fallas de la red y se produce un corte de suministro a los usuarios y por ende pérdida económica.

A través del estudio de la confiabilidad se pueden aumentar la complejidad de los sistemas eléctricos interconectando si es necesario, conocer la diversidad del clima en que la red es explotada y los daños que provoca a la economía de la concesionaria si la energía no es suministrada, hasta inclusive daños a la salud con pérdidas humanas si la red eléctrica no posee la suficiente confiabilidad (BROW, 2008).

A lo expuesto y dada la importancia de la energía eléctrica para el desarrollo social y por ello se busca mantener los valores de confiabilidad del sistema de distribución en altos porcentajes, acorde a las posibilidades y requerimientos de una concesionaria.

A través del estudio de la confiabilidad se anhela maximizar la calidad de la energía eléctrica y minimizar el número y duración de los cortes de suministro. Es por ello, que este trabajo propone evaluar la confiabilidad de una red eléctrica de distribución real mediante el Método de Índices de la IEEE y el Método de *Weibull*, utilizando para los cálculos registros históricos de la duración y frecuencia del corte de suministro utilizadas en las fórmulas de las metodologías. Se puede mensurar la confiabilidad de la red eléctrica de distribución en estudio y de esa manera, este trabajo se presenta como un material didáctico para futuros trabajos de evaluación de la confiabilidad.

También es importante, conocer o predecir los valores de la duración de los cortes de suministro, a través de los registros históricos hacen posible tomar decisiones que puedan afectar la confiabilidad del sistema de distribución, es por ello que el trabajo también plantea conocer el valor de dichas interrupciones en futuros años mediante el Método T de *Student* y de Regresión Lineal Simple.

Además, el trabajo busca abordar un aporte bibliográfico de las investigaciones en el área a través del método *Proknow-C* y de los conceptos más importantes en área de confiabilidad.

## 1.4 ESTRUCTURA DE LA DISERTACIÓN

En el siguiente capítulo se presentan los principales elementos teóricos que integran este trabajo. Se consideraron aquellos de relevancia para la comprensión del tema abordado y que sirve de referencia para otros fines académicos,

Se organiza en el capítulo dos una introducción teórica de la conceptualización de calidad de energía, cuáles son los factores que influyen en ella y las principales ocurrencias que afectan su calidad y su continuidad, además de las referencias bibliográficas halladas a través de las palabras claves del método *Proknow-C*.

En el siguiente capítulo, tres, se presenta el referencial teórico del método de trabajo seguido para la elaboración de la disertación acorde a los objetivos específicos planteados, también en la sección se presentan casos didácticos con ejemplos para la comprensión de los métodos estudiados.

En el capítulo cuatro se presenta el sistema real estudiado como estudio de caso, donde se expone las principales características del sistema eléctrico de distribución.

En el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos de la metodología aplicada y se compara los valores de confiabilidad entre los métodos i) Índices obtenidos del IEEE 1366 y (ii) de *Weibull*. También se plantean hipótesis si la duración de los cortes de suministro en el 2022 podría aumentar un 20% en comparación al 2021 o doblarse inclusive el valor de las duraciones mediante el Método T de *Student*. También, se realiza una predicción de las duraciones a través del Método de Regresión Lineal Simple.

También se presenta las principales conclusiones de acuerdo a los objetivos específicos planteados y referente a los resultados obtenidos y las bibliografías utilizadas para la realización del trabajo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Con el fin de ofrecer una idea más clara del trabajo, el referencial teórico se divide en dos secciones, la primera sección trata sobre las principales referencias bibliográficas obtenidas de la aplicación del método *Proknow-C* y el análisis de patentes referente al área de confiabilidad. En la segunda sección se trata de la teoría que fundamenta los conceptos básicos de la confiabilidad del servicio eléctrico en términos de continuidad y las principales perturbaciones que conllevan a los cortes de energía eléctrica que es notada por los usuarios.

### 2.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

En esta sección se presenta la metodología realizada por el método *Proknow-C*, que es una herramienta para la búsqueda y análisis cuantitativo de artículos, con el objetivo de identificar, de forma estructurada y eficiente, un portafolio bibliográfico con los artículos científicos más relevantes sobre el tema de una investigación. (ENSSLIN *et al*, 2018).

Se consideraron los pasos del método en el estudio: i) Selección del portafolio bibliográfico; ii) Análisis bibliométrico del portafolio bibliográfico; iii) Análisis sistémico del portafolio bibliográfico; iv) Pregunta de investigación. Según las etapas, se definieron los siguientes dos ejes de investigación con las Palabras Clave (PC) de cada eje y en la Tabla 1, puede verse la combinación *booleana*.

Eje	PC
1 <i>Electrical Distribution System</i>	1 <i>Energy quality, continuity of service, radial topology, power quality</i>
2 <i>Reliability method</i>	2 <i>Reliability method</i>

Tabla 1: Combinación booleana de las pc.

Eje 1	Boleano	Palabras Claves
<i>ElectricalDistribution System</i>	<i>And</i>	<i>Energyquality</i>
		<i>Continuityofservisse</i>
		<i>Radial topology</i>
		<i>Weibull</i>
<i>Reliability Method.n</i>	<i>And</i>	<i>IEEE1366</i>
		<i>Simulator</i>

Fuente: La autora, (2020).

Considerando la alineación de la investigación y la combinación booleana de “eje 1 and PC”, las PC de cada eje se combinaron con el otro para constituir el Banco de Artículos Brutos (BAB) que se buscaron en Julio del 2022 en las bases de datos: *Web of Science* (WoS), ANTE (*ProQuest*) y *Scielo*. Teniendo como filtros las PC que contenían 2315 títulos en el BAB, los resultados de esta investigación se enviaron a *Mendeley* para los siguientes pasos definidos por el método *Proknow-C*: i) Eliminación de artículos duplicados: 530 duplicados; ii) Lectura de títulos y remoción de artículos con títulos fuera de la temática: 1.475 artículos excluidos, quedando con 27 artículos alineados; iii) Determinar en *Google Scholar* el número de citas para cada artículo iv) Leer el resumen de cada artículo con la alineación de la temática, habiendo así 14 artículos. Al finalizar el análisis bibliográfico puede verse en la Tabla 10 y marcada por área de actuación de cada producción científica y su aporte al trabajo.

Tabla 2: Resumen por área del portafolio bibliográfico.

Autor	SD	Indicadores de Continuidad de Servicio	Confiable de la red	Métodos de Aplicación	Calidad de energía
(KEMABOTA y MOWRY 2021)	●	●	●		●
((PING-CHEN, DING-HSIANG y LANCE, 2021)	●	●	●	●	●
(AGARWAL, JAIN, <i>et al.</i> , 2021)	●	●	●	●	●
(TOFANI, D'AGOSTINO, <i>et al.</i> , 2021)	●	●	●		●
((BIRYULIN, KUDELINA e LARIN, 2020)	●	●	●		●
(YASER, AZRIYENNI e SUKMA, 2020)	●	●	●	●	●
(DIMOV, TZVETKOVA e LOZANOV, 2020)	●	●	●		●
(LEVY e CARRASCO, 2020)	●	●	●	●	●
(MIHAI e HELEREA, 2019)	●	●	●	●	●
(PETLESHKOV e LOZANOV, 2019)	●	●	●	●	●
(TAPIA, 2019)	●	●	●	●	●
((BARBOSA, SHAYANI e GONÇALVES, 2018))	●	●	●	●	●
SOLÍS y ARCOS, 2018	●	●	●	●	●

Fuente: La autora, (2021).

### 2.1.1 Análisis De Artículos Científicos

En el trabajo de (BARBOSA, SHAYANI y GONÇALVES, 2018). evalúan el desempeño de la empresa de distribución de electricidad en el uso de un índice global único. El enfoque propuesto permite clasificar la calidad del servicio de acuerdo a tres parámetros: continuidad del suministro, conformidad del voltaje y la satisfacción del cliente centrado en las distribuidoras bajo el mando de la ANEEL que establece los indicadores de la calidad de servicio con base a Procedimientos de Distribución de Energía Eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional (PRODIST). Este estudio propone un método de evaluación global de la calidad de los servicios prestados por las distribuidoras de electricidad en Brasil, considerando los aspectos técnicos y de satisfacción del cliente, con el uso de una métrica basada en análisis de decisión multicriterio (MCDA), para determinar una clasificación de empresas y la confiabilidad de las mismas.

Según (SOLÍS y ARCOS, 2018) para configuración óptima de la red eléctrica debe basarse principalmente en el criterio de confiabilidad y ésta no ha estado presente durante mucho tiempo en la etapa de planificación de las redes eléctricas de distribución. Desarrollan una metodología que consiste en una herramienta para el análisis de confiabilidad como un criterio en el diseño de las redes eléctricas, desarrollando un modelo de optimización de costos de inversión mediante la evaluación de los criterios de la confiabilidad de red eléctrica. El trabajo mencionado es provechoso como referencia ya que por medio de la confiabilidad establecen criterios para la planificación de la red eléctrica.

Según (MIHAI y HELEREA, 2019) los indicadores de continuidad de servicio los que caracterizan también la calidad del servicio eléctrico son parámetros estadísticos útiles para determinar la confiabilidad del sistema. Estos indicadores pueden describir local o globalmente el funcionamiento del sistema de distribución eléctrico para adoptar medidas y de esa manera reducir las pérdidas económicas involucradas por el corte de suministro. Presenta un análisis de los indicadores de continuidad SAIDI (*System Average Interruption Frequency Index*) y SAIFI (*System Average Interruption Duration Index*), los resultados del estudio de caso respaldan los factores involucrados en la elección de la solución óptima de tal manera que se mejoren los indicadores como optimizar los recursos de la red eléctrica, buen desempeño de la concesionaria y seguimiento a los valores de confiabilidad que la clave de desempeño del sistema eléctrico de distribución y el vínculo entre la confiabilidad de la instalación eléctrica y la calidad de la energía a través de la calidad del servicio.

Los autores (PETLESHKOV y LOZANOV, 2019) presentaron un trabajo de análisis de las interrupciones de un sistema eléctrico de distribución, en el que en 2017 se instalaron nuevos equipos en la línea eléctrica para localizar más rápidamente los tramos dañados y desconectarlos reparar dicho tramo y reestablecer más rápido la energía eléctrica disminuyendo el tiempo de interrupción y aumentando la confiabilidad de la red. En el artículo citado se realizó una clasificación de las causas de los cortes de energía antes y después de la modernización para luego compararlos en el que considerablemente 40% disminuyó el valor de las veces del corte de suministro. También se determina la duración media de las interrupciones y los indicadores de continuidad eléctrica SAIFI y SAIDI para el período 2012 a 2018.

El autor (TAPIA, 2019) realiza un análisis de confiabilidad a cinco alimentadores de una subestación de los años 2017 y 2018 con el objetivo de mejorar la continuidad del servicio eléctrico realizando dos estudios: las causas de las interrupciones y la coordinación de protecciones. Utiliza la metodología de cálculo de indicadores para determinar si los índices obtenidos son perjudiciales o aceptables para la implementación de nuevas protecciones. El trabajo aporta material a la investigación por la experiencia del análisis en varios alimentadores de una subestación y la importancia de conocer el comportamiento de cada línea referente a los indicadores de continuidad del servicio eléctrico.

En la obra de los autores (BIRYULIN, KUDELINA y LARIN, 2020) discuten de los problemas de confiabilidad del sistema de distribución urbano y presentan los problemas que reducen considerablemente la calidad de energía eléctrica: cambios lentos de voltaje, fluctuaciones de voltaje, asimetría de voltaje en un sistema trifásico, tensión no sinusoidal. Este artículo radica su importancia en que desarrollan medidas para mantener la calidad de la energía eléctrica dentro de límites aceptables en un sistema de distribución urbano y requiere monitorear los indicadores de calidad de la energía eléctrica. En base a los resultados, desarrollan un conjunto de medidas para mejorar la calidad de la electricidad y por ende aumentar la confiabilidad de del sistema de distribución eléctrico.

Los autores (YASER, AZRIYENNI y SUKMA, 2020) propusieron analizar y calcular el nivel de confiabilidad de un sistema de distribución de 13,8 kV en base a las fallas ocurridas en seis alimentadores a través del Método de Índices de los datos de apagones obtenidos, el índice de confiabilidad se vuelve más pequeño y se puede distinguir entre interrupciones permanentes y temporales. Este estudio utiliza la norma en que establece el

análisis del índice MAIFI (*Momentary Average Interruption Frequency Index*) se cumple en la muestra que es el corte de suministro de 5 veces/año/clientes. El trabajo es similar al tema planteado utilizando como método de estudio el Método de Índices. Sin embargo, no realiza una comparación con otros métodos y enfoca el análisis en las veces de corte de suministro y esta investigación en la duración y la frecuencia.

Para los autores (DIMOV, TZVETKOVA y LOZANOV, 2020) según la topología de un sistema de distribución adoptada puede aumentar o disminuir la confiabilidad del sistema eléctrico y los indicadores de continuidad de servicio, porque según las interconexiones que se puedan realizar puede aumentar o no la duración y veces de los cortes de suministro. En la investigación presentan resultados del análisis de los indicadores de continuidad del suministro eléctrico en el sistema de distribución de dos regiones de Bulgaria. Analizaron y evaluaron el impacto del tipo de redes de distribución eléctrica en los indicadores de calidad del suministro eléctrico en redes de distribución de media tensión y determinaron las posibilidades de reducción de los indicadores de cortes en el suministro eléctrico para aumentar la confiabilidad del sistema radial en estudio.

En el trabajo de los autores (LEVY y CARRASCO, 2020) analizan la confiabilidad del sistema de distribución en algunos países de América Latina: Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, Perú y Uruguay. Analiza a través de los Indicadores de Continuidad de Servicio como se muestra en la Tabla 3. La media de la duración de cortes de suministro es expresada en minutos.

. Tabla 3: Valores de indicadores de países.

Pais	Duración media de las interrupciones min.	Frecuencia media de las interrupciones fallas/año
Argentina	1730	7
Brasil	1070	14
Colombia	39	60
Costa Rica	6	8
Perú	3676	28
Uruguay	632	6

Fuente: Adaptado de (LEVY y CARRASCO, 2020).

Este material ofrece información acerca de la experiencia de los países en la cuestión de confiabilidad e impacto económico y social a través de los indicadores adoptados por cada país.

En el trabajo de (SEGURA, 2021 ) evalúa el método de confiabilidad estándar IEEE 1366 para mejorar el desempeño del sistema eléctrico. Proponen un método de cálculo para mejorar los índices de confiabilidad de cuatro alimentadores de la subestación San Francisco de Perú. Concluye que para mejorar la confiabilidad se deben integrar equipos de protección e integrar nuevas tecnologías a la red eléctrica gracias al estándar IEEE1366. Este trabajo demuestra similitud con el tema abordado, ya que abarca el Método IEEE1366 estudiado también para definir la confiabilidad del sistema de distribución eléctrica.

En el artículo (KEMABONTA y MOWRY, 2021) analizan el histórico de confiabilidad en de la red norteamericana y de los problemas de Minnesota. Analizan las métricas para medir la confiabilidad de la red y realizan una recomendación de la resiliencia de la red eléctrica de distribución como en casos de la súper tormenta Sandy en 2012 y el huracán María en 2017, que sumergieron a millones de personas en la oscuridad. El trabajo mencionado desarrolla y recomienda un marco para la aplicación de este enfoque sincrético para los operadores de red y los responsables políticos en Minnesota, para lograr que los eventos a gran escala no afecten de sobremanera a la confiabilidad de la red eléctrica. Esta investigación demuestra su interés en el caso de que es necesario calcular la confiabilidad de la red eléctrica a través de los históricos para poder realizar los cambios necesarios y elevar su valor.

Según (PING-CHEN, DING-HSIANG y LANCE, 2021) la confiabilidad se degrada con el tiempo, por ello, se requiere un método para cuantificar la confiabilidad variante en el tiempo. El artículo propone un método para calcular la confiabilidad de una red de flujo capacitado multi-estado en términos de componentes caracterizados por una distribución de vida. El enfoque permite el cálculo de la probabilidad de que la demanda pueda satisfacerse durante un período de tiempo a pesar de la degradación de los componentes. Se proporcionan ejemplos para aclarar los pasos requeridos y para ilustrar las evaluaciones habilitadas. Basado en la teoría de confiabilidad clásica, la función de confiabilidad de *Weibull* se emplea para caracterizar la degradación de los componentes de la red. Este trabajo es similar al que se realiza en esta investigación, sin embargo, utiliza la definición de degradación de *Weibull* para los componentes del sistema de distribución, pero con la desventaja que no puede compararse con otro método y en esta propuesta se analiza a la red eléctrica en sí contrastando con el Método de Índices calculados mediante IEEE1366.

En el trabajo de (AGARWAL, JAIN, *et al.*, 2021) analizan la confiabilidad de la red

eléctrica de distribución del tipo radial a través del método de *Weibull* con una variable: el efecto del envejecimiento del transformador. Define a la confiabilidad como la capacidad del sistema para sobrevivir a pesar de las adversidades, Por lo tanto, la investigación de confiabilidad del sistema de distribución radial asegura significativamente la continuidad del servicio al final del consumidor. Además, con la edad, la tasa de fallas del equipo también aumenta, lo que también aumenta significativamente la frecuencia de fallas y el costo de interrupción para los consumidores. Es necesaria una predicción de la tasa de fallas para la programación adecuada del mantenimiento y el reemplazo de equipos antiguos. El trabajo para lograr la futura tasa de recurrencia de interrupción para el transformador en tiempo real, utiliza la función de densidad de probabilidad de *Weibull*. En la investigación mencionada, se estudia la frecuencia de interrupción con diferentes intervalos de tiempo, parámetros de forma variable que tienen efecto en el Costo Esperado de Interrupción (ECOST) y la Energía No Servida (ENS). Este trabajo es similar al tema planteado, sin embargo, estudia al transformador de distribución diferenciándose en ese tema, ya que el análisis del tema de investigación es la red eléctrica en sí.

Los autores (TOFANI, D'AGOSTINO, *et al.*, 2021) presentaron un artículo donde definen la importancia de la resiliencia del sistema de distribución eléctrico ante perturbaciones y cuál sería el impacto en los indicadores de continuidad de servicio en la confiabilidad. Para los autores la resiliencia es una combinación de las tecnologías integradas a las redes eléctricas, como así la habilidad de gestión de dichas redes para aumentar la confiabilidad. El trabajo propone un modelo de capacidad de la red para recuperarse ante perturbaciones y cuáles son los parámetros que influyen para no lograrlo, como la topología de la red, las propiedades tecnológicas de sus elementos activos, los sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), los procedimientos de automatización y la eficiencia de gestión. Este tema planteado es de interés ya que demuestra que el estudio de confiabilidad de una red eléctrica es necesario para poder involucrar tecnologías en la red eléctrica y se diferencia en ese aspecto.

En vista de la importancia de las innovaciones tecnológicas en el área de la ingeniería, concretamente en la eléctrica en la siguiente sección se presenta el análisis de diez patentes referente al área de investigación.

### 2.1.2 Análisis De Patentes

Por medio de las patentes se desarrollan nuevas tecnologías, se fomenta la investigación y ello permite el desarrollo tecnológico en empresas e industrias. Desde el punto de vista de empresas o investigadores, se propone una solución a un problema determinado a través del desarrollo de métodos, propuestas y equipos para mejorar una dificultad, en este trabajo la confiabilidad de la red eléctrica.

Con el fin de analizar conocimientos expandidos en el área de investigación de este trabajo referentes al tema de confiabilidad, se realiza el análisis de patentes, fueron obtenidos y seleccionados a través de la integración de las palabras claves.

La propuesta de (CAI, LIANG, *et al.*, 2018) aborda un tipo de método en el que se descompone el índice de confiabilidad de la red de distribución en el que aborda: la descomposición del índice de interrupción programada; la descomposición del índice de fallas eléctricas aleatorias en cada unidad de base y la fusión del índice de cortes programados, el resultado de la descomposición del índice de fallas eléctricas aleatorias. En la invención el índice se asigna y tiene racionalidad científica, propiedad abierta y clara, factibilidad operativa. Los hechos han demostrado que esta descomposición del índice de confiabilidad es exactamente razonable, simple y práctico, conveniente para aplicar en la oficina de suministro del sistema de distribución.

En el trabajo de (GU, XU, *et al.*, 2016) la invención se refiere a un método y un dispositivo para evaluar dinámicamente la fiabilidad de una red. El método comprende los siguientes pasos: Primeramente lo que se realiza es a) Capturar información topológica de la red (radial, bucle abierto o mallada) y acorde a las informaciones evaluar en el siguiente paso acorde a la topología; b) a través de la primera evaluación si afecta a la confiabilidad la topología, ejecutando el paso siguiente; c) en caso afirmativo que sí afecte a la confiabilidad la topología de la red en estudio se ejecuta el siguiente paso y en caso negativo se cierra el bucle; entonces en el caso que sea positivo d) se debe determinar un punto fuente y un nodo objetivo de la red a evaluar; esa evaluación se debe realizar en el siguiente proceso a través de e) la adquisición de datos de fallas en la red y creación de una base de datos; para poder obtener en el siguiente proceso f) la obtención de una función de ruta de red OBDD (Diagrama de Decisión Binario Ordenado) este diagrama se utiliza como ruta de estructura de datos para cuestionarios referente a la confiabilidad de la red en estudio y a través de ello

evaluar la fiabilidad de la red mediante un algoritmo de expansión lateral basado en OBDD y entrar en el paso siguiente que es; g) buscar la variación de la información topológica de la red que afecta a la confiabilidad a través de registros históricos de la red eléctrica de distribución, luego; h) adquirir los datos de fallos registrados recientemente aumentados e i) introducir los datos de fallos recientemente aumentados en la base de datos a través del conocimiento de fallas en la red se realiza el siguiente paso que es; j) evaluar la fiabilidad de la red mediante la función de ruta de red OBDD obtenida mediante el último proceso de evaluación y un algoritmo de evaluación dinámica basado en los OBDD para luego k) emitir un resultado de evaluación de confiabilidad de la red y una sugerencia de evaluación.

Los autores (ZHAO, RONGWAN, *et al.*, 2015) describen un tipo de método para analizar la confiabilidad de un sistema de distribución basado en la distribución de probabilidad perteneciente al campo de la tecnología para aumentar la confiabilidad de dichos sistemas. En la patente realiza un análisis de tiempos de interrupción utilizando la comparación de la distribución de *Weibull*, exponencial y *Poisson*. El objetivo del documento es adoptar un análisis infinitesimal donde supone que el elemento período medido a través del tiempo en la tasa de falla interna es constante, entonces la regla obedece a la distribución de índices de su interior de falla aleatoria, no sistemáticamente registrado. La evaluación de la confiabilidad de la red de distribución generalmente adopta un índice de confiabilidad anual, por lo tanto y propone un intervalo en parámetro la aquiescencia igual a uno. Se expresa un análisis aproximado para la función aleatoria del índice de confiabilidad de la red de distribución, y necesita un índice de nivel de subsistema y un índice de punto de carga y describe estas situaciones.

Para (ZHEN, WANG, *et al.*, 2013) las metodologías ajustan la tasa de falla de un componente para el análisis de confiabilidad de la red de energía eléctrica. Un componente puede incluir subcomponentes y la falla de cada subcomponente puede depender de la característica. Las características son entradas medibles u observables, que pueden afectar la vida de uno o más subcomponentes. La tasa de falla de un componente en particular se puede obtener de acuerdo a sus condiciones reales. Las metodologías se pueden utilizar para realizar análisis de confiabilidad basados en la condición para un sistema de distribución eléctrica, con el fin de obtener una estrategia de mantenimiento y/o reemplazo y/o operación. Reclaman un método, en el que se puede determinar la información representativa de una tasa de fallas de un componente de un sistema de distribución que comprende recibir una

tasa de fallas de un almacén de datos que contiene las tasas de fallas de una pluralidad de componentes del sistema de distribución, en donde la tasa de fallas para cada componente de la red eléctrica se basa en una población de componentes de la red eléctrica del mismo tipo.

En el trabajo de los autores (VENDITTI, RAMESH, *et al.*, 2014) realizan una técnica que incluye un método de recopilación de datos configurado para compilar datos de un sistema de control de una red eléctrica de distribución. La técnica incluye además un procedimiento de gestión de configuración de la red y es alineado para gestionar una configuración de *hardware* y una configuración de *software* para el sistema de control en base a los datos obtenidos de los indicadores. El sistema también incluye reglas configuradas para usar los datos como entrada y generar una evaluación de confiabilidad mediante el uso de una base de datos de reglas, y un generador de informes.

Los autores (PRABIR y TRENT, 2013) realizaron un sistema de estabilización del sistema de distribución eléctrica para mejorar la confiabilidad que incluye un procesador y una interfaz de red ejecutable por el procesador para monitorear nuevos datos de eventos de dispositivos de consumo de energía a través de la red. Los nuevos datos de eventos pueden incluir información como la ubicación del dispositivo, información operativa y datos del sensor. El sistema incluye un dispositivo de estimación operable para analizar los nuevos datos de y un predictor operable para anticipar la ocurrencia de un evento futuro en respuesta al análisis. El predictor también puede predecir el resultado del evento futuro basándose en el análisis de los datos del nuevo evento en relación con los datos del comportamiento pasado del dispositivo de consumo.

En el trabajo de (YANG, WU y ZHAO, 2013) realizaron una invención que proporciona un tipo de método de estimación de la distribución exponencial del límite inferior de confianza de la confiabilidad del sistema de distribución. De acuerdo con la característica de distribución exponencial, se obtiene la relación estructural de composición del sistema desde el ángulo de la tasa de reparación, finalmente por el límite superior de la tasa de falla del sistema a través del método de Monte Carlo se obtiene bajo un nivel de confianza. Luego de este proceso se obtiene la confianza de confiabilidad del sistema más bajo, que es un límite de especial preocupación en ingeniería. La invención propone un tipo de método exacto que resuelve el límite inferior de confianza de la confiabilidad del sistema y obedece a la distribución del índice, calcula fácilmente, proporciona un algoritmo de

relleno de datos, amplía el rango utilizable para los datos de censura aleatoria.

Los autores (RONG, WAN, *et al.*, 2012) realizaron una invención que divulga un tipo de método de determinación de confiabilidad de la red de distribución basados en la distribución de probabilidad, estos métodos de determinación se basan en la base del índice de confiabilidad existente, propone los siguientes tres índices confiabilidad: de la red, de distribución, y de confiabilidad de la red de distribución. Esta relación se logra mediante expresión analítica: antes de la falla del sistema después, el tiempo de trabajo, el tiempo de liberación de falla del sistema y la frecuencia de falla del sistema. De esta manera se analiza el índice de confiabilidad del sistema de distribución respectivamente para caracterizar combinando con tecnología de probabilidad no paramétrica, se calcula la fórmula de expresión de función aleatoria del índice de confiabilidad de la distribución de probabilidad. El índice que este método propone recientemente es el suplemento útil del sistema de índice de confiabilidad de la red de distribución existente, contribuye al carácter aleatorio general de que el nivel de confiabilidad del sistema en estudio.

La invención de (NASLE y ADIB, 2010) trata de un sistema para proporcionar un modelado en tiempo real de un dispositivo de protección en un sistema de distribución bajo gestión. El sistema incluye un componente de adquisición de datos, un modelado de sistemas virtuales y un modelo de análisis. El componente de adquisición de datos está conectado de forma comunicativa a un sensor configurado para proporcionar mediciones en tiempo real de la salida de datos de los dispositivos de protección dentro del sistema bajo administración. El modelado del sistema virtual está configurado para actualizar un modo virtual del sistema en función del estado de los dispositivos de protección y para generar datos previstos para el sistema utilizando el modelo virtual actualizado. De esta manera en tiempo real se manejan los datos de la red y actuar de forma eficiente ante una perturbación y mantener un sistema confiable y estable.

Para (BRYNN, LEE, *et al.*, 2006) la confiabilidad y el tiempo restante antes de fallar para los sistemas eléctricos y similares se determina con una confianza estadística comprobada basada en parámetros del sistema monitoreados continuamente y una base de datos compuesta por modo/causa de falla histórica y datos de reparación relacionados con el mismo motor y/o sistemas de motores similares. Se sigue un proceso computacional que se basa en estructuras jerárquicas de árbol de fallas, distribuciones de probabilidad de *Weibull* y redes causales dirigidas y que actualiza las probabilidades y los modelos utilizados para

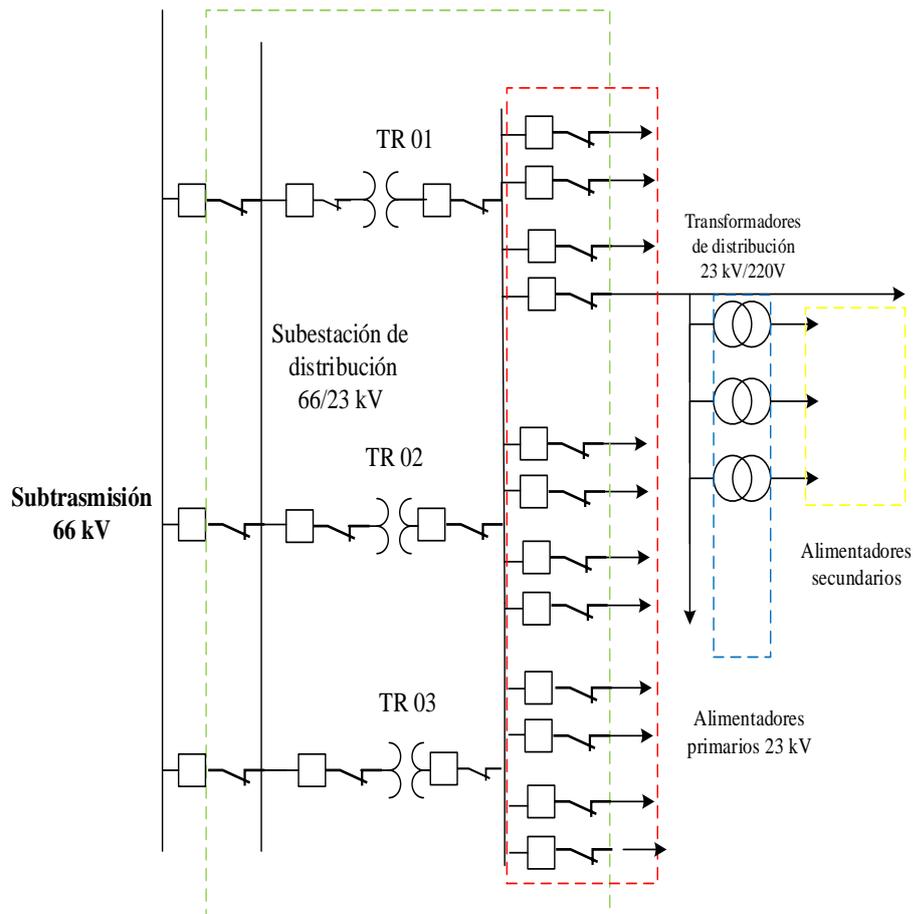
pronosticar el tiempo restante antes de la falla del sistema en función de los parámetros monitoreados.

## 2.2 CONCEPTOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

Los sistemas de distribución eléctrica forman una parte muy importante de los sistemas eléctricos de potencia, una vez que toda la energía que se demanda se tiene que distribuir entre los consumidores y éstos se encuentran dispersos en diferentes puntos. Entonces, una red de distribución está formada principalmente por un conjunto de cables (aéreos y/o subterráneos) y los centros de transformación (responsable por adecuar los niveles de energía para su uso). Las funciones de los elementos de un sistema de distribución son (JUÁREZ CERVANTES, 1995): A seguir los elementos de la Figura 1.

- a) Subestación principal de potencia: Ésta recibe la potencia del sistema de transmisión y la transforma al voltaje de subtransmisión (230 - 500 kV).
- b) Sistema de subtransmisión: Son las líneas que salen de la subestación (SSEE) principal para alimentar a las SSEE de distribución. Las tensiones de subtransmisión son normalmente de 115-230 kV.
- c) Subestación de distribución: Se encarga de recibir la potencia de los circuitos de subtransmisión y de transformarla al voltaje de los alimentadores primarios (66 kV. Maneja potencias de decenas de MW, por ejemplo, bancos de transformadores de 20 o 60 MVA.
- d) Alimentador primario: Son los circuitos que salen de las SSEE de distribución y alimentan los transformadores de distribución. La potencia de los alimentadores depende del voltaje de distribución (2,4 - 34,5 kV).
- e) Transformador de distribución: Reduce el voltaje del alimentador primario al voltaje de utilización del usuario. Los voltajes de utilización comunes son de 440 V y de 220 V entre fases.

Figura 1: Ejemplo de diagrama sistema de distribución.



Fuente: La autora, (2022).

### 2.3 CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCION

El sector eléctrico busca incrementar el grado de exigencias en relación a la calidad de la energía eléctrica en términos de confiabilidad (BERGER y INIEWSKI, 2015) y define:

**A- Calidad de Servicio:** Según (BERGER y INIEWSKI, 2015), la calidad del servicio final es definido por:

- a) Calidad del producto: Caracterizado por, por la magnitud, frecuencia y contaminación de la tensión de alimentación instantánea;
- b) Calidad de suministro: Caracterizado por la frecuencia, profundidad y duración de las interrupciones en el suministro;
- c) Calidad de servicio comercial: Caracterizado por el período de restauración del servicio, la información de calidad brindada al cliente.

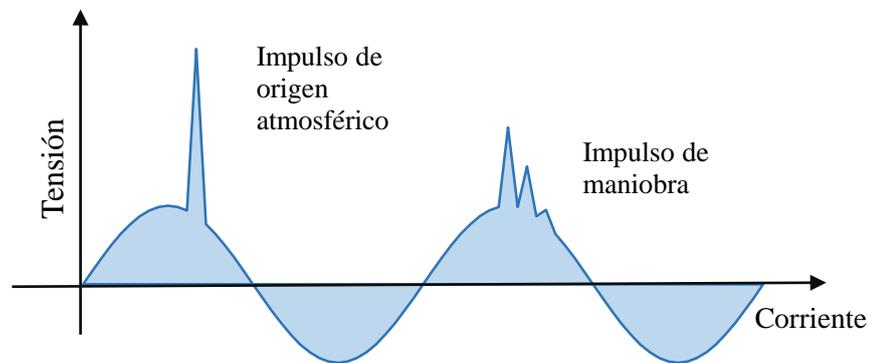
**B- Atributos de la Calidad Energética:** La calidad de suministro de energía eléctrica

se encuentra en función de los atributos según (BROW, 2008) (i). disponibilidad, (ii). el cumplimiento con energía limpia, (iii). restauración en tiempo mínimo, (iv). la flexibilidad para las transformaciones en su estructura. Estos son los principales atributos que requiere actualmente el sistema eléctrico.

### 2.3.1 Perturbaciones Asociadas A La Calidad De La Electricidad.

Los principales fenómenos electromagnéticos que ocurren con la forma de onda del voltaje de suministro del sistema y están asociados con la calidad de la energía, por ejemplo, en la Figura 2 se indica un momento de sobretensión, la primera es causada por una descarga atmosférica y la segunda es de una maniobra en la subestación.

Figura 2: Momento de una sobretensión.



Fuente: Adaptado de (KEY BPS, 2018).

Las perturbaciones de la tensión son:

- a) Saltos de voltaje: Generalmente causados por rayos que pueden caer de forma inesperada, provocando una interrupción en el servicio, destrucción de equipos y/o dañar a personas.
- b) Transitorios de tensión oscilatoria: Son fluctuaciones en el valor instantáneo de la tensión. En general, son provocados por las maniobras de equipos y líneas de transmisión.
- c) Cortes de tensión: Son discontinuidades en el valor de tensión instantáneo, generalmente provocadas por un cortocircuito entre fases.

### 2.3.2 Indicadores De Continuidad De Servicio

Según (LEVY, 2020) es importante que el servicio eléctrico se encuentre disponible cuando se requiera. Por ello, constan que la continuidad del suministro eléctrico se refiere a la provisión del servicio sin interrupciones. Esta definición solo mide si el servicio es provisto, no incluye la calidad de la onda a la que se presta e incluye los estudios de la Pérdida de Energía No Facturada.

La Norma IEEE 1366 *Guide For Electric Power Distribution Reliability Indices* (IEEE, 2013) define a la interrupción como: La pérdida total de energía eléctrica en uno o más conductores normalmente energizados a uno o más clientes conectados a la porción de distribución del sistema y a un corte como: La pérdida de la capacidad de un componente para entregar energía que no incluye problemas en la calidad de energía.

Toda interrupción del servicio eléctrico es contabilizada, es por eso que la Norma IEEE 1366 las definen a través de los indicadores SAIDI como la duración de las interrupciones generalmente medidas en minutos; y SAIFI refiere a la frecuencia de las interrupciones, las veces en el que el sistema sufrió de un corte en el suministro eléctrico en un período de tiempo y suelen presentarse anualmente. La Pérdida de Energía No Facturada (PENF) se calcula, a través de estos indicadores, siendo también uno de los tres indicadores de interés del trabajo.

### 3 MÉTODOS UTILIZADOS

En este capítulo se aborda los métodos utilizados para el cálculo de confiabilidad y la predicción de las duraciones del corte de suministro, como así los ejemplos para mayor comprensión del tema.

La confiabilidad de un sistema de distribución tiene un gran impacto en el sistema eléctrico, es de suma importancia en la industria de la energía eléctrica, en gran parte de ella depende la economía de la concesionaria. El estudio de confiabilidad evalúa la operación del sistema de distribución, compara su desempeño y logra fortalecer el sistema, modernizando infraestructuras obsoletas y permite (BROW, 2008):

- a) Gestionar infraestructura envejecida: Mediante el estudio de confiabilidad se puede tomar decisiones para mejorar estructuras antiguas que conlleven pérdidas económicas a la concesionaria.
- b) Endurecer los sistemas de distribución de energía eléctrica: Un seguimiento de confiabilidad del sistema permite fortalecer el sistema de distribución.
- c) Evitar las trampas comunes de la evaluación comparativa: A través del estudio de confiabilidad se puede demostrar exactamente como se encuentra el sistema de distribución, si opera confiablemente o es necesario una reestructuración de la misma para su mejor operación. No existe otro método de evaluación de una red eléctrica que no sea la evaluación de la confiabilidad. Por ejemplo, no se puede evaluar la red eléctrica solamente considerando las veces de corte de suministro sin seguir un método de confiabilidad y asumir que por un valor determinado de veces el sistema de distribución se encuentra operando en óptimas condiciones, para asegurar, debe efectuarse el estudio de confiabilidad mediante métodos.
- d) Aplicar una gestión de riesgos eficaz: Mediante el estudio de confiabilidad se puede emplear la gestión de riesgos eficazmente, por ejemplo, se puede analizar y cuantificar las probabilidades de eventos que puedan afectar al sistema de distribución y de esa manera realizar acciones preventivas o correctivas para mantener los valores de confiabilidad elevados. Como un caso sería, si una línea de un sistema de distribución frecuentemente no es suministrada de energía

eléctrica a causa de una estructura vieja, una buena gestión de riesgos debe corregir.

El concepto de confiabilidad de un sistema de distribución para las compañías de suministro de energía eléctrica generalmente se refiere a la cantidad de tiempo que los usuarios están totalmente sin energía por la interrupción sostenida (BROW, 2008).

Según (SÁNCHEZ, 2009), los estándares actuales de calidad de la energía consideran como interrupción sostenida cualquier pérdida total de potencia mayor a un minuto. En cualquier caso, la confiabilidad es afectada por las fallas permanentes del sistema que deben ser reparadas antes que el servicio sea restaurado.

### 3.1 MÉTODOS PARA CALCULAR LA CONFIABILIDAD EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

La confiabilidad se puede definir de la siguiente manera: Es la probabilidad de que un sistema, activo o componente lleve a cabo su función adecuadamente durante un período bajo condiciones operacionales previamente definidas y constantes (HUERTA, 2006). Los métodos para aproximarse a la confiabilidad de un sistema y se describen a continuación:

#### 3.1.1 Método De Confiabilidad Basada En Índices IEEE1366.

Este método está basado en los índices obtenidos de la norma IEEE 1366, para hallar la confiabilidad se obtiene los parámetros de Tasa de Falla y Tasa de Reparación para determinar la confiabilidad de un sistema de distribución eléctrica y se describe a continuación:

- a) Tasa de Fallas ( $\lambda$ ): Se puede obtener un valor dimensional, expresada normalmente en las fallas de redes eléctricas horas/falla. Está dada por la expresión (2.1).

$$\lambda = \frac{\text{Tiempo de operación sin fallas}}{\text{Número total de fallas registrado}} \quad (2.1)$$

- b) Tasa de reparación ( $\mu$ ): Se define como el tiempo de falla sobre el número de fallas registradas en un tiempo t (años, meses, días). La ventana de tiempo utilizado debe ser la misma que se utilizó en la tasa de fallas.

$$\mu = \frac{\text{Tiempo acumulado de no operación}}{\text{Número total de fallas registrado}} \quad (2.2)$$

- c) Confiabilidad basada en registros: Ambos parámetros anteriores actúan juntos en una ecuación basadas en tasas con el fin de obtener un porcentaje que indique el grado el grado de confiabilidad de la siguiente manera:

$$\% \text{Confiabilidad} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.3)$$

Con el objeto de una mejor visión a continuación se presenta un ejemplo de aplicación del Método Índices mediante los valores obtenidos de la aplicación de la norma IEEE 1366.

**Ejemplo de aplicación:** (HERRERA, 2017). Considérese un historial de un año en el cual se presentaron 50 horas de fallas en una barra de carga y doce veces en el tiempo medido. La tasa de fallas en tal punto se podrá calcular de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{\text{Horas sin fallas}}{\text{Nº de fallas}} = \frac{8710 \text{ horas}}{12 \text{ fallas}} = 725,83 \frac{\text{horas}}{\text{fallas}} \quad (2.4)$$

Luego se calcula la tasa de reparación y se considera que un punto de falla ha tenido 12 fallas en un año, cuyos datos de tiempos de fuera de operación es de 50 horas en total, entonces la tasa de reparación será: horas/año.

$$\mu = \frac{\text{Tº acumulado de no operación}}{\text{Nº total de fallas registrado en un año}} = \frac{50 \text{ horas}}{12} = 4,16 \frac{\text{horas}}{\text{fallas}} \quad (2.5)$$

Ambos parámetros actúan juntos con el fin de obtener un porcentaje que indique el grado de confiabilidad de la siguiente manera:

$$\% \text{Confiabilidad} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{725,83}{725,83 + 4,16} = 99,47\% \quad (2.6)$$

**Fin del ejemplo de aplicación:** Del ejemplo presentado tiene una confiabilidad del 99,42 % según el número de fallas del sistema y la duración de dichas fallas que es el tiempo de reparación.

Este método presenta sus ventajas de fácil aplicación con los datos necesarios que

son la cantidad de fallas y la duración de las mismas. Además, evalúa la confiabilidad en un tiempo determinado, eso da la pauta que a través de los sucesos entre varios periodos puede compararse la confiabilidad de un sistema eléctrico. Pero la desventaja de este método es que la confiabilidad está en función de la disponibilidad del total de tiempo estudiado y las veces. Para que tenga un bajo valor de confiabilidad tiene que tener un alto valor de indisponibilidad, más de 1.000 horas al año.

### 3.1.2 Método De Confiabilidad De *Weibull*

Las principales características de la Distribución *Weibull* son útiles en la modelación de fallas de componentes y equipos, el modelo es una función de densidad de probabilidad y el método más eficiente en la estimación de los parámetros, es el método de máxima verosimilitud. Este método permite encontrar los valores más probables de los parámetros de una distribución de probabilidad para un conjunto de datos (BIROLINI, 2017). Para el modelo se siguen los siguientes pasos:

- a) Primero se calcula la desconfiabilidad, que se proyecta aproximadamente a través de rangos medianos (RM):

$$RM(t) = \frac{i + 0,3}{n + 0,4} \quad (2.7)$$

Donde:

$i$  = Es cada mes.

$n$  = Cantidad total de meses.

0,3 = Constante propio del modelo para cada periodo  $i$ .

0,4 = Constante propio del modelo para el tiempo total  $n$ .

- b) Se halla los ejes del gráfico de *Weibull* a través de las siguientes ecuaciones. Eje x la ecuación 2.7 y eje y la 2.8.

$$x = \ln t \quad (2.7)$$

$$y = \ln (-\ln R) \quad (2.8)$$

$t$  = Tiempo

$R$  = Confiabilidad.

- c) Los valores obtenidos de los datos presentados, harán posible graficar el comportamiento y proyectar la confiabilidad en la Ecuación de Tasa de Fallas en la Ecuación 2.9 y la ecuación general de la Confiabilidad en la ecuación 2.10.

$$\lambda = \frac{\beta}{n} x \left( \frac{t}{n} \right)^{\beta-1} \quad (2.9)$$

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{n} \right)^\beta \right] \quad (2.10)$$

Donde:

$\beta$  = Determina si el sistema está en etapa inicial, fallas aleatorias o desgaste.

$\gamma$  = Define los parámetros.

$\eta$  = Es el exponencial entre la constante y beta.

**Ejemplo de aplicación:** Considerando el ejemplo anterior, se considera un registro de 33 horas de inactividad en dos periodos (12 y 21 horas de falla), se desea determinar la confiabilidad por el Método de *Weibull* de cada equipo. Primero se construye de la tabla de distribución de horas de fallas (Tabla 4). luego se calcula la desconfiabilidad en función de rangos medianos en las ecuaciones (2.11) y (2.12).

Tabla 4: Tabla de distribución horas de fallas.

Periodo	Hora de Fallas
1	12
2	21

Fuente: La autora, (2022).

$$RM(t)_1 = \frac{i-0,3}{n+0,4} = \frac{1-0,3}{2+0,4} = 0,29 \quad (2.11)$$

$$RM(t)_2 = \frac{i-0,3}{n+0,4} = \frac{2-0,3}{2+0,4} = 0,70 \quad (2.12)$$

El paso siguiente es graficar la función logarítmica a través del logaritmo neperiano  $\ln$  en función del tiempo para el eje x y de la confiabilidad en el eje y. En las ecuaciones del (2.13) al (2.16).

$$x_1 = \ln(12) = 2,48 \quad (2.13)$$

$$x_2 = \ln(21) = 3,04 \quad (2.14)$$

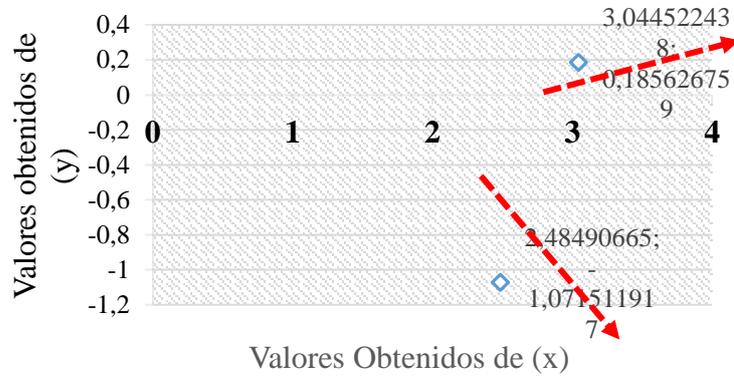
$$y_1 = \ln(-\ln R) = \ln\{-\ln * (1-0,29)\} = -1,07 \quad (2.15)$$

$$y_2 = \ln(-\ln R) = \ln\{\ln * (1-0,70)\} = 0,18 \quad (2.16)$$

La obtención de los puntos anteriores es para colocar en un gráfico de dispersión.

En la siguiente Figura 3, puede observarse la ubicación de los puntos en el gráfico.

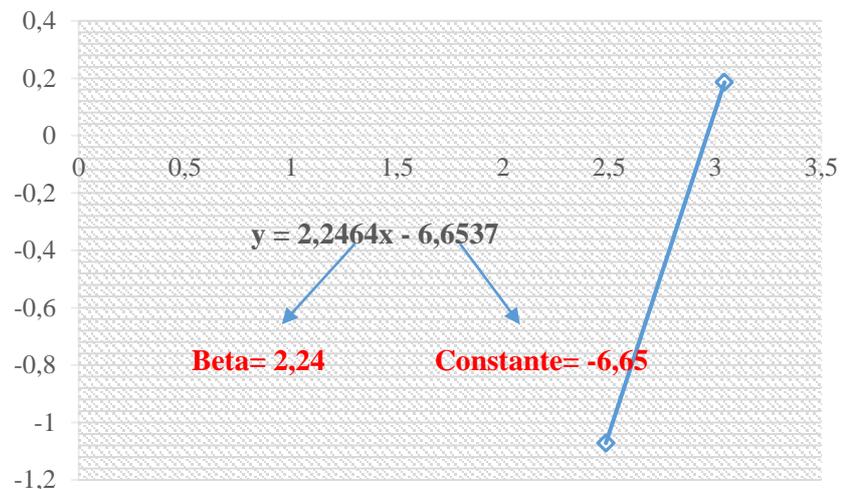
Figura 3: Valores obtenidos de x e y.



Fuente: La autora, (2022).

Luego de obtener las ecuaciones de las funciones se proyecta en una planilla a través de una gráfica de dispersión mostrado, se grafica la función x e y a través de los resultados obtenidos de las ecuaciones anteriores. Una vez obtenida el gráfico de las funciones se agrega la línea de tendencia del gráfico y se obtiene la ecuación del gráfico del cual se obtiene el valor de beta y de la constante para calcular la ecuación de confiabilidad de *Weibull*. En la Figura 4 se puede observar el Gráfico de la Función de *Weibull* y la ecuación obtenida de dicho gráfico para determinar en qué etapa se encuentra el ejemplo planteado.

.Figura 4:Gráfico de función de *Weibull*.



Fuente: La autora, (2022).

La etapa de desgaste beta  $\beta$  que es el parámetro que determina si el sistema está en etapa inicial, fallas aleatorias o desgaste en este caso de la ecuación es igual a:

$$\beta = 2,24 \quad (2.17)$$

$$\text{cte} = 6,65 \quad (2.18)$$

El sistema se encuentra en etapa de desgaste o deterioro ya que el valor de beta supera a 2 ( $\beta > 1$ ). En la ecuación 2.19 se calcula el valor de eta ( $\eta$ ) para calcular posteriormente el valor de la confiabilidad.

$$\eta = \exp\left(\frac{\text{Cte}}{\beta}\right) = \exp\left(\frac{6,65}{2,24}\right) = 19,30 \quad (2.19)$$

Al finalizar se calcula la confiabilidad de *Weibull* de los equipos en las ecuaciones 2.20 y 2.21:

$$R(t_1) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{n}\right)^\beta\right] = \left\{ \exp\left[-\left(\frac{12}{19,30}\right)^{2,24}\right] \right\} * 100 = 70,23\% \quad (2.20)$$

$$R(t_2) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{n}\right)^\beta\right] = \left\{ \exp\left[-\left(\frac{21}{19,30}\right)^{2,24}\right] \right\} * 100 = 29,87\% \quad (2.21)$$

**Fin del ejemplo de aplicación:** La confiabilidad del equipo 1 es del 70,23 % y la del equipo 2 es del 29,87 % asumiendo la realidad de beta que efectivamente el sistema se encuentra en deterioro.

La ventaja de este método es que puede resolverse con los datos en que un sistema ha estado fuera de servicio según los registros históricos obtenidos. Es usada en muchas aplicaciones especialmente en ingeniería para obtener el valor de la confiabilidad, además, permite diagnosticar si el comportamiento de fallas del sistema según la duración de las mismas se encuentra en una etapa inicial, constante o de deterioro y de esa manera, tomar decisiones referentes al estudio de cada caso si es necesario (AGARWAL, JAIN, *et al.*, 2021). En la siguiente Tabla 5, puede observarse las ventajas y desventajas principales de los métodos estudiados.

Tabla 5: Ventajas y desventajas de métodos estudiados.

Método	Ventajas	Desventajas
Índices	- Fácil aplicación. - Aplicable a un activo, sistema o componente.	- Calculo por la disponibilidad total en el periodo de estudio. - Utiliza cantidad y duración de fallas.
<i>Weibull</i>	- En función a la duración de las fallas. - Precisa en el análisis de fallas.	- No reconoce las veces de las fallas. - Difícil aplicación.

Fuente: La autora, (2022).

### 3.2 MÉTODOS PARA ESTIMAR DURACION DE CORTE DE SUMINISTRO

Un análisis predictivo utiliza técnicas estadísticas a través del procesamiento de datos, emplea datos históricos para predecir eventos futuros a través de métodos que utiliza datos pasados y actuales para pronosticar lo que pasará a continuación, de esta manera, sugerir acciones para llevar a cabo a través de los resultados obtenidos (PEREIRA, 2010).

La duración de un corte de suministro eléctrico causa pérdida económica a las concesionarias, porque a mayor duración, mayores son las pérdidas económicas, por ello, es importante estimar un valor aproximado de las duraciones de las interrupciones a través de los registros históricos para tomar decisiones al respecto. Para este trabajo se analizan la duración de los cortes de suministro a través del Método T de *Sudent* y Regresión Lineal Simple.

#### 3.2.1 Método T-*Student*

En este método se utiliza el tipo de muestras relacionadas o pareadas, quiere decir que se hace mediciones a la misma población en dos tiempos distintos (MURRAY y STEPHENS, 2009).

Es por ello que a través del registro de datos de la concesionaria en estudio se propone estimar los valores de las duraciones de corte de suministro. De acuerdo al sistema de distribución real estudiado los datos recabados del año 2020 y 2021 de la concesionaria, el valor de las duraciones de corte de suministro había aumentado considerablemente en el 2021 en comparación al 2020, es por eso que se plantea una hipótesis a través del Método de T de *Student* si en el 2022 los valores de los cortes serían también el doble referente al 2021. Ya que el valor de las duraciones en el 2021 es el doble que, en el 2020, si los valores para el 2022 seguirían la tendencia. En caso de aceptarse o rechazarse la hipótesis también se plantea si dichas duraciones podrían durar al menos el 20% a más del valor del 2021 para

el 2022. El 20% mencionado es con el objeto de realizar un análisis más profundo de la estimación de valores hipotéticos.

El método T de *Student*, no da un valor real de la duración de corte de suministro, sino acepta o rechaza la hipótesis planteada de un valor determinado, en este caso si las interrupciones durarán el doble o al menos el 20% del 2021 para el 2022.

Entonces, se plantea obtener un valor aproximado de las duraciones de corte de suministro a través del Método de Regresión Lineal Simple, se pronostica cuál sería dicho valor para el año 2022, 2023 y 2024 a partir de los datos de los años 2017, 2018, 2019, 2020. Como mencionado anteriormente la importancia de obtener un valor aproximado de las duraciones de corte de suministro en las concesionarias mediante el Método de Regresión Lineal Simple es la adecuada, porque matemáticamente la regresión usa una función lineal para aproximar o predecir una variable dependiente (tiempo de interrupciones) a través de una variable independiente (años en estudio) según (VINUESA, 2016). La desventaja del método es que no considera la obsolescencia de los equipos, ni la causalidad de los números de las variables, sino a través de los registros de los años mencionados obtener una estimación del valor de las duraciones de corte de suministro.

En este caso se define la variable independiente a los años y la variable dependiente es la duración de los cortes de suministro, eso quiere decir que con el transcurrir del tiempo los valores de los cortes varían. Es importante aclarar que por este método se busca un valor aproximado a través de su valor indicador, entonces se realiza a través de los últimos cinco años que pueda obtenerse una premisa más real del comportamiento del valor de los cortes de suministro y que el valor en horas de corte de suministro estimado sea más confiable.

Entonces, mediante el Método de T de *Student* se puede crear hipótesis acerca del comportamiento del corte de suministro y a través del Método Regresión Lineal Simple un valor predictivo de las duraciones del corte de suministro.

Se formula la hipótesis nula  $H_0$ , que es la hipótesis que se desea aceptar o rechazar donde se propone que la duración del corte del suministro en el año 2022 será el doble que el año 2021 como muestra la ecuación 2.22. Esta hipótesis se plantea ya que en el 2021 la duración de los cortes de suministro fue el doble en comparación al 2020 y si en el 2021 se sigue la tendencia y  $H_1$  la hipótesis alternativa rechaza a la hipótesis nula en caso de no ser

así se demuestra en la ecuación 2.23.

En caso de rechazarse la primera hipótesis, se plantea un valor hipotético si al menos aumentará el 20% el valor del corte de suministro en el 2022 a través de los valores del 2021 en las ecuaciones 2.24 y 2.25.

$$H_0: \mu_2 = 2\mu_1 \quad (2.22)$$

$$H_1: \mu_2 \neq 2\mu_1 \quad (2.23)$$

$$H_0: \mu_2 = 0,2\mu_1 \quad (2.24)$$

$$H_1: \mu_2 \neq 0,2\mu_1 \quad (2.25)$$

El Estadístico de prueba se obtiene de la ecuación 2.26

$$t = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_C^2}{n_1} + \frac{S_C^2}{n_2}}} \quad (2.26)$$

$\bar{X}_{1,2}$  = Medias muestrales

$S_C^2$  = Varianza común y se obtiene en la ecuación 2.27.

$$S_C^2 = \frac{(n_1-1) S_1^2 + (n_2 - 1) S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2.27)$$

$n$  = Cantidad de elementos de la muestra uno y dos.

$S_1^2$  y  $S_2^2$  = Varianza muestral de los grupos 1 y 2.

El método de T de *Student* es útil para aceptar o rechazar hipótesis que se desea comprobar. En la siguiente sección se demuestra un caso de aplicación.

**Ejemplo de aplicación:** Considerando el caso del Método de *Weibull*, se plantea la hipótesis si la duración en el siguiente periodo hipotético fuese el 20% a más de la medida, podría demostrarse en las ecuaciones 2.28 y 2.29 que.

$$H_0: \mu_2 = 0,2\mu_1 \quad (2.28)$$

$$H_1: \mu_1 \neq 0,2\mu_1 \quad (2.29)$$

Entonces la duración de la falla en el periodo 1 es de 12 horas, se plantea la

hipótesis so podría durar 14,4 horas en el siguiente periodo. También en un lapso de tiempo es medida 21 horas de falla y se desea plantear la hipótesis si durará 25,5 horas. Primero se calcula el promedio de los grupos como puede observarse la ecuación 2.30 y la ecuación 2.31.

$$\bar{x}_1 = \frac{12+21}{2} = 16,50 \quad (2.30)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{39,9}{2} = 19,95 \quad (2.31)$$

Para la cantidad de elementos de cada grupo correspondiente es  $n_1 = n_2 = 2$  porque son dos elementos totales que es el periodo uno y periodo dos. Luego se calcula la varianza muestral en la ecuación a través de una planilla con la función var.s del grupo uno y grupo dos, como respuesta las ecuaciones (2.32) y (2.33). Para el cálculo de la varianza común en la ecuación (3.34) y para el estadístico de prueba t en la ecuación (2.35).

$$S_1^2 = 40,5 \quad (2.32)$$

$$S_2^2 = 60,6 \quad (2.33)$$

$$S_C^2 = \frac{(2-1)*40,5 + (2-1)*60,6}{2+2-2} = 50,55 \quad (2.34)$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_C^2}{n_1} + \frac{S_C^2}{n_2}}} = \frac{16,5+19,5}{\sqrt{\frac{50,5}{2} + \frac{50,5}{2}}} = 5,06 \quad (2.35)$$

El grado de libertad está definido en la ecuación (2.36) y para valores de alfa se define el 5% que es la tolerancia de aceptar o rechazar la hipótesis planteada en la ecuación (2.37).

$$gl = (n_1 + n_2 - 2) = (2 + 2 - 2) = 2 \quad (2.36)$$

$$\alpha = 5\% = 0,05 \quad (2.37)$$

Ahora se calcula el valor crítico mediante la función inv.t.2c. en la ecuación (2.38) a través de la inversa de distribución T de dos colas, porque la prueba de

hipótesis es de dos colas.

$$\text{Valor crítico} = \text{inv.t.2c} \left( \frac{0,05}{2} \right) = 4,3 \quad (2.38)$$

Para la probabilidad del valor, que es la probabilidad de que suceda la hipótesis planteada, se utiliza la función dist.2c entre el valor crítico y los grados de libertad. Para obtener el p-valor en la ecuación (2.39).

$$\text{p-valor} = \text{dist.2c}(4,6;2) = 0,05 \quad (2.39)$$

**Fin del ejemplo de aplicación:** En este caso el p-valor resulta exactamente que el valor de significancia alfa y se acepta la hipótesis nula de que la cantidad de horas de falla puede aumentar el 20% en el siguiente periodo de medición.

En la siguiente sección se realiza la predicción aproximada de las mediciones de dichas duraciones por cuatro periodos mediante el Método de Regresión Lineal Simple.

### 3.2.2 Método Regresión Lineal Simple

Según (VINUESA, 2016) las ventajas de este método, utiliza los valores de una variable independiente y a partir de ella pronostica los valores de una variable dependiente. En este trabajo, la regresión lineal sirve para modelar de forma matemática el comportamiento de una variable dependiente (duración de cortes de suministro), esta variable es la que se desea pronosticar en función a una variable independiente año (2021 – 2022 - 2023 y 2024). Este modelo es generalmente utilizado para realizar pronósticos por medio de la ecuación de la recta (2.40).

$$y = a + bx \quad (2.40)$$

y = Variable dependiente

a = Ordenada con el eje y

b = Pendiente de la recta de regresión

x = Variable independiente

$$a = \bar{y} + b\bar{x} \quad (2.41)$$

$$b = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2} \quad (2.42)$$

$x$  = Valores conocidos de la variable independiente

$y$  = Valores conocidos de la variable dependiente

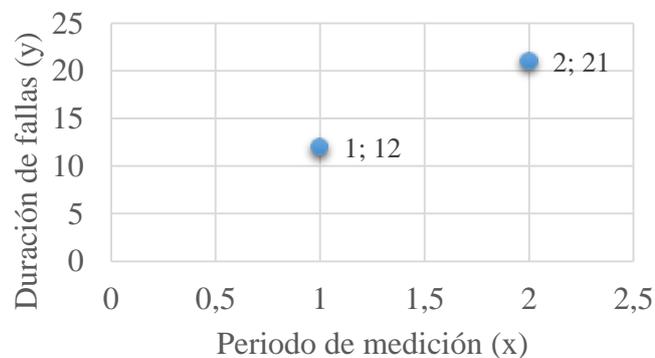
$\bar{x}$  = Promedio de las  $x$

$\bar{y}$  = Promedio de las  $y$

$n$  = Número de datos puntuales en observación.

**Ejemplo de aplicación:** Del ejemplo anterior en el que se midieron las horas de falla durante el periodo uno de 12 horas y periodo dos de 21 horas. Se desea pronosticar la duración por el siguiente periodo que es el periodo tres. En la Figura 5 se observa el gráfico de ubicación de coordenadas.

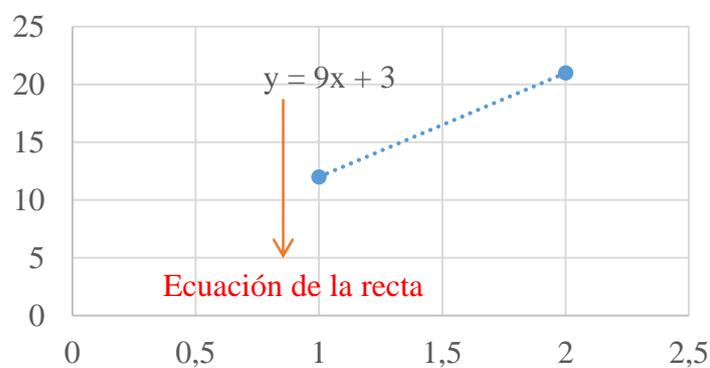
Figura 5: Gráfico de ubicación de coordenadas.



Fuente: La autora, (2022).

A través de los puntos ubicados en el plano de la tabla se traza una línea de tendencia y se genera la ecuación lineal de la recta como puede observarse en la Figura 6.

Figura 6: Gráfica de la función lineal.



Fuente: La autora, (2022).

Luego de señalar los puntos en el gráfico, se traza la línea de tendencia como se

mostró en la Figura 6 y se obtiene la ecuación del gráfico que es la de Regresión Lineal Simple (2.43).

$$y = 9x + 3 \quad (2.43)$$

A través de la ecuación anterior se calcula el valor y de la duración de los cortes en el periodo tres, reemplazando la x por el tres y también se asigna para el cuarto periodo, reemplazando la x por el cuatro, sería en las ecuaciones 2.44 y 2.45.

$$y = 9x + 3 = 9*(3) + 3 = 30 \quad (2.44)$$

$$y = 9x + 3 = 9*(4) + 3 = 39 \quad (2.45)$$

**Fin del ejemplo de aplicación:** Según el Método de Regresión Lineal Simple, la duración de fallas del periodo tres serían de 30 horas y la del periodo cuatro 39 horas aproximadamente.

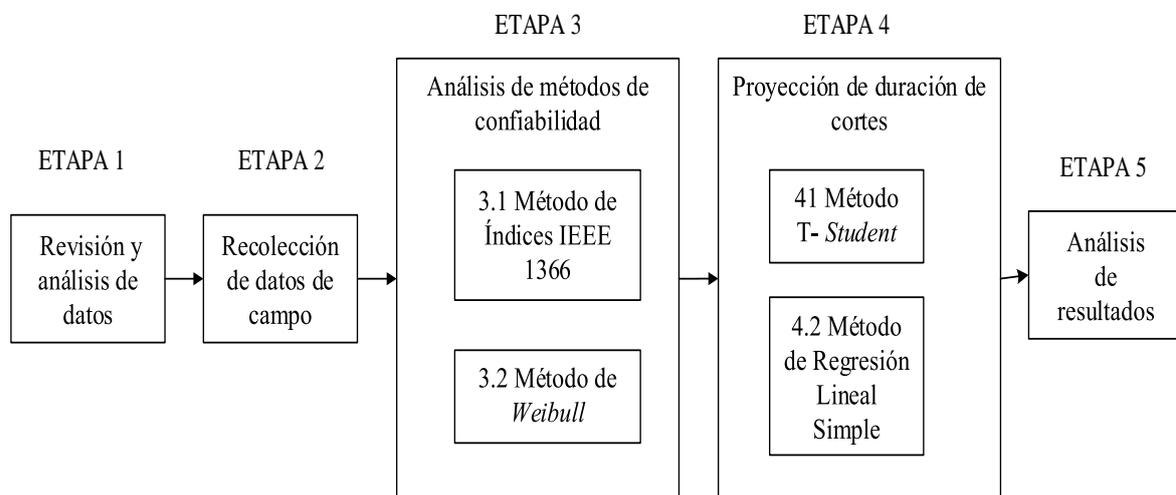
Ambos métodos estudiados, tienen sus diferencias como así sus ventajas: (i) Método T de *Student* tiene su ventaja que se fundamenta en las premisas mediante la formulación de hipótesis alterando los valores de datos conocidos para demostrar si tal alteración puede suceder en un futuro a través de un riesgo asumible. (ii) El Método de Regresión Lineal Simple, sencillo de construir a través de la ecuación de la recta, los valores de la variable independiente se reemplazan y dan valor a la variable dependiente, es segura y de fácil aplicación con al menos cuatro variables independientes, para el trabajo se utilizará cinco variables independientes que son los años 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021.

## 4 ESTUDIO DE CASO

Para lograr los resultados de los métodos mencionados en el capítulo anterior se presenta las etapas seguidas para la obtención de datos del sistema de distribución real, el estudio de métricas de la concesionaria, el análisis de confiabilidad de la red eléctrica y proyectar la predicción de la duración de corte de suministro.

Para la obtención de los resultados de los objetivos mencionados nteriormente el trabajo sigue el flujograma como indica la Figura 7, se divide en cinco etapas que se detalla a continuación:

Figura 7: Flujograma de trabajo.

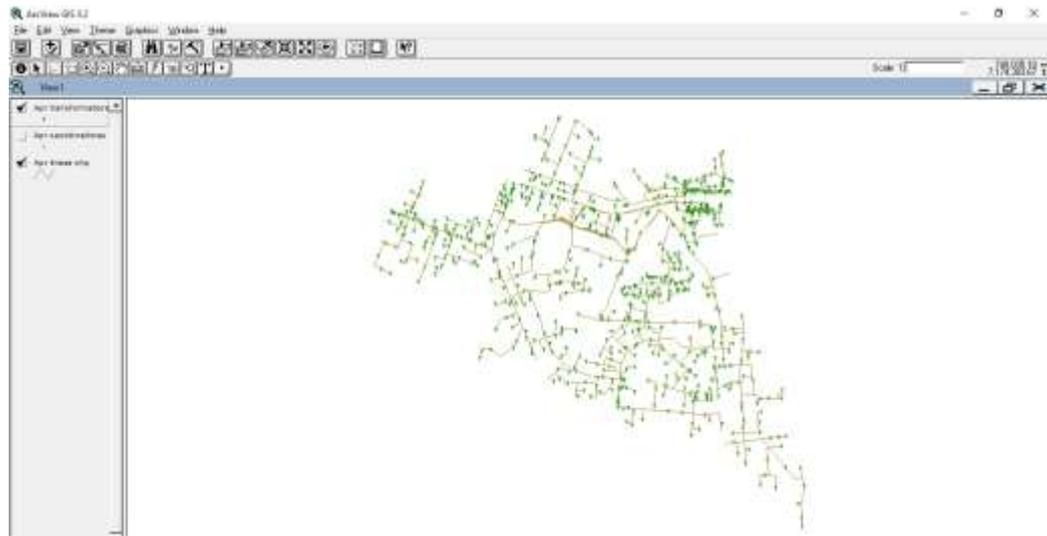


Fuente: La autora, (2022).

Etapa 1- Revisión y análisis de datos: Para la obtención de los datos se recurre a la concesionaria responsable de suministrar la energía eléctrica (ANDE). Estos datos reales son obtenidos inicialmente del *software ArcView*® que un programa de información geográfica con coordenadas, para datos espaciales y mapas.

En la Figura 8 puede observarse el interfaz del programa *ArcView*® más la ubicación geográfica los alimentadores de la SSEE en estudio con los transformadores instalados sobre la misma, de este *software* se registra una planilla de *excel* la potencia individual en kVA de los transformadores distribuidos sobre los alimentadores del sistema de distribución.

Figura 8: Interfaz del programa arcview.



Fuente: La autora, (2022).

Posterior al análisis de los datos se selecciona la muestra, que es el total de alimentadores con carga de la subestación estudiada. De doce alimentadores, fueron estudiados diez, dos fueron desconsiderados por no contener carga instalada ni estar distribuida de forma aérea fuera de la subestación.

Etapla 2- Recolección de datos de campo: Se procede al estudio de los datos de los Indicadores de Continuidad de Servicio de la concesionaria en base a datos de (i) Maniobras de los alimentadores de la SSEE Alto Paraná, (ii) Del Registro Diario de la Sección de Operación, (iii) Datos técnicos de equipos instalados y (iv) Datos topológicos disponibles en la base de datos georreferenciados. La herramienta de cálculo empleado es un módulo de cálculo de indicadores de calidad (FEP, DEP y PENF), el mismo integra el Sistema de Gestión de Distribución Eléctrica – SGDE cuya plataforma de operación es el *Smallworld CST 4.0*® que es un sistema de gestión de infraestructura geoespacial que posee la capacidad de interrelacionarse con otras tecnologías digitales que gestiona el ciclo de vida completo de la infraestructura además de poder calcular los indicadores mencionados (ANDE, 2020).

Los índices calculados son la Duración Equivalente de Potencia (DEP), Frecuencia Equivalente de Potencia (FEP) y una estimación de la Pérdida por Energía No Facturada (PENF). La metodología empleada es el cálculo por tramos, serían tramos afectados por el corte de suministro. Los índices señalados corresponden a los alimentadores de la

Subestación Alto Paraná. El número de transformadores y la de los alimentadores se encuentra descrita en la Tabla 6 La cantidad de consumidores asociadas a los transformadores no fue proveída.

Tabla 6: Características SSEE Alto Paraná.

Descripción	SSEE Alto Paraná				
	Distancia (km)	Material del conductor	Número de transformadores	Monofásica (kVA)	Trifásica (kVA)
A <sub>1</sub>	2,0	Cobre	72	5338,67	16.016
A <sub>2</sub>	4,3	Cobre	68	3500,00	10.500
A <sub>3</sub>	4,8	Cobre	91	5326,00	15.978
A <sub>4</sub>	2,3	Aluminio	72	4213,33	12.640
A <sub>5</sub>	1,9	Cobre	68	4210,00	12.630
A <sub>6</sub>	Fuera de servicio				
A <sub>7</sub>	2,8	Cobre	98	6154,00	18.462
A <sub>8</sub>	Fuera de servicio				
A <sub>9</sub>	1,8	Cobre	28	2596,00	7.788
A <sub>10</sub>	5,1	Cobre	124	8222,00	24.666
A <sub>11</sub>	4,0	Cobre	45	3308,00	9.924
A <sub>12</sub>	4,3	Cobre	51	3200,00	9.600

Fuente: La autora, (2022).

El tipo de distribución de los alimentadores es aérea, de la subestación salen de forma subterránea y luego se distribuyen de forma aérea a través del poste de distribución.

Etapa 3- Aplicación de métodos de confiabilidad: Se analiza los datos obtenidos de los registros del Centro de Operación de Distribución del Este durante los años 2020 y 2021, luego de aplicar los métodos de Análisis de Confiabilidad para posteriormente comparar los resultados obtenidos entre sí conseguidos de los años en estudio.

- a) Método de Indicadores: Utiliza los datos obtenidos mediante la IEEE 1366 para índices de confiabilidad de distribución. Emplea el registro histórico de la duración de cortes de suministro y la frecuencia de los cortes de suministro, a través de los registros se calcula la confiabilidad del sistema eléctrico, por alimentador (LEVY y CARRASCO, 2020)
- b) Método de *Weibull*: Se realiza el análisis de la confiabilidad mediante el tratamiento de los datos en función al tiempo. Se grafica la función en la escala logarítmica donde se grafican las duraciones del corte de suministro y se dibuja la línea de regresión de mínimos cuadrados (BIROLINI, 2017).

Etapa 4- Proyección de la duración de cortes de suministro: Estimar la duración de las interrupciones es uno de los estudios predictivos necesarios para pronosticar la Pérdida de Energía No Facturada del sistema. En esta etapa a través de dos métodos se dimensiona el probable valor de la duración de interrupciones. Ya que, a mayor duración, PENF aumenta. Los métodos son los siguientes:

- a) Método T de *Student*: Se utiliza como un modelo de predicción creando hipótesis y a través de los cálculos verificar si es aceptada o rechazada. Entonces, al tener los datos de la duración de los cortes de suministro del año 2020 y 2021 se formula la hipótesis nula (MURRAY y STEPHENS, 2009) de que la duración de los cortes de suministro puede doblarse para el 2022.
- b) Método Regresión Lineal Simple: Este método es utilizado para la predicción relacionando dos variables, en este caso el año es la variable independiente y DEP la variable dependiente. A través de dichos datos la regresión lineal genera una ecuación, basándose en la relación de las dos variables que permita predecir el valor de una a partir de la otra (BIROLINI, 2017).

Etapa 5- Análisis de resultados: En este paso se realizan las comparaciones del análisis de los resultados obtenidos de los Métodos de Confiabilidad: Índices y *Weibull*, también se realiza las comparaciones entre los años en estudio.

También se analizan los resultados obtenidos de la proyección de predicción de la duración de cortes de suministro y se realizan comparaciones del resultado de los análisis, del Método de T de *Student* (la hipótesis se acepta o se rechaza) y comparar con el valor de la predicción del Método de Regresión Lineal Simple si cuál sería el valor de las duraciones del corte de suministro. Mayores detalles serán presentados en las subsecciones siguientes.

Las etapas mencionadas están desarrolladas en este capítulo y se divide en tres partes para una mejor comprensión y es (i) Las características del sistema de distribución real estudiado donde se expone el sistema. (ii) La confiabilidad de la red eléctrica calculados a través del Método de Índices y de *Weibull*. (iii) El análisis predictivo de la Duración Equivalente de Potencia a través del Método de T de *Student* y Regresión Lineal Simple.

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN REAL

El sistema de distribución real está localizado, en Ciudad del Este, Paraguay y hace parte de la Administración Nacional de Electricidad, ANDE, siendo un sistema de distribución dentro de una zona urbana, la misma comprende de (i) Subestación de distribución, (ii) Doce alimentadores primarios de los cuales diez serán utilizados, se descartan dos por no poseer carga instalada y (iii) 718 transformadores de distribución aproximadamente.

La Subestación de distribución se encarga de recibir la potencia de los circuitos de subtransmisión alimentada con una tensión de 66 kV y de transformarla al voltaje de 23 Kv para los alimentadores primarios. Esta SSEE contiene un banco de seis transformadores que es alimentado en 66 kV y transforma los valores en 23 kV, cada transformador tiene una potencia nominal de 20 MVA. En la Figura 9 puede observarse la barra de alimentación en 66 kV que alimenta al transformador.

Figura 9: Barra de alimentación y transformador.



Fuente: La autora, (2022).

Los alimentadores primarios son los circuitos que salen de la barra de salida de la subestación en una tensión de 23 kV, responsables de suministrar energía eléctrica a los transformadores de distribución como puede observarse en la Figura 10.

Figura 10: Sistema de distribución.



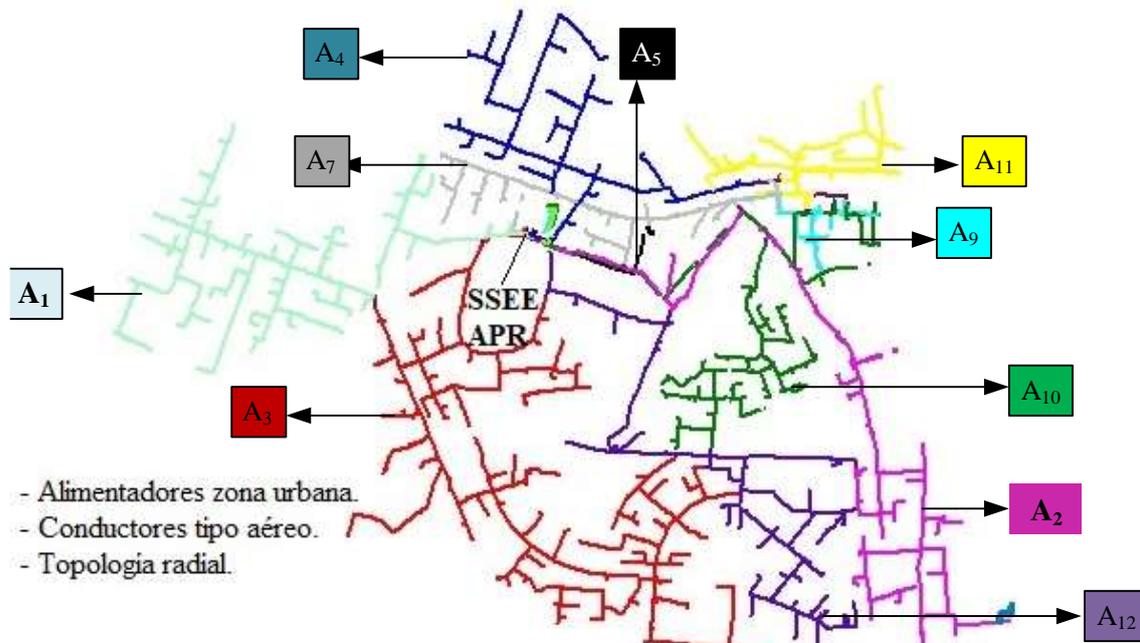
Fuente: La autora, (2022).

Luego de la presentación del sistema de distribución real a ser estudiado, se presenta las tareas a realizar para obtener los resultados del trabajo:

- a) Revisión y análisis de datos: Consiste en conseguir los datos de la red eléctrica de distribución de la concesionaria mediante una nota disponible en el *drive*. Los instrumentos a utilizar son: (i) Cuestionarios; estructurados con preguntas abiertas y respondidas por referentes del área; (ii) Hojas de registro; para datos recopilados para análisis posteriores; (iii) Análisis de documentos no impresos proporcionados por la concesionaria que contienen los datos esenciales para el desarrollo del trabajo.
- b) Selección de Muestra: Es tomada del *software CymDist*® que es un paquete base para análisis de un sistema de distribución, agrupa todas las herramientas de modelado y análisis necesarias para realizar diversos tipos de simulaciones involucradas en la planificación del sistema eléctrico. En la Figura 11 la

interconexión de los 10 alimentadores que es la cantidad total de alimentadores de zona urbana del sistema, de los cuales los alimentadores 6 y 8 no poseen carga ni están conectados en el sistema.

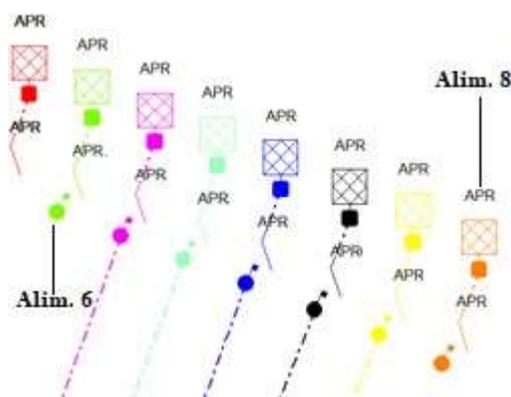
Figura 11: Área de muestra, alimentadores de una zona urbana



Fuente: La autora (2020).

Los alimentadores seis y ocho no se visualizan en la imagen anterior debido a que no se encuentran distribuidos de forma aérea, nada más poseen una salida en la subestación como indica la Figura 12.

Figura 12: Salida alimentador seis y ocho.

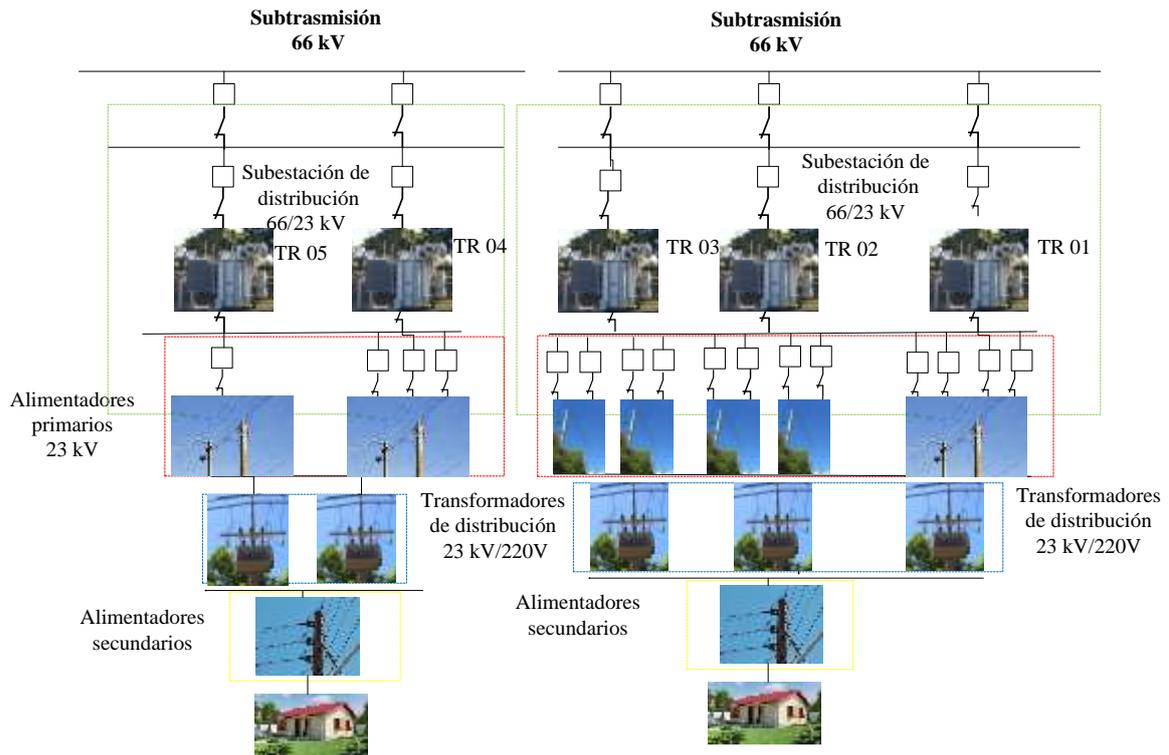


Fuente: La autora, (2022).

c) Recolección de datos de campo: Fueron extraídos del *software ArcView* ®.

Donde el área que abarca la subestación es de siete kilómetros de longitud de norte a sur y seis kilómetros de este a oeste, los alimentadores se distribuyen como indica la figura anterior y el diagrama unifilar de la subestación se muestra en la Figura 13. En la ilustración se observa que los transformadores TR01, TR02, TR03, TR04 y TR05.

Figura 13: Diagrama unifilar de la SSEE APR.



Fuente: La autora, (2022).

En total el 95% de los transformadores instalados sobre los alimentadores de distribución son trifásicos, que operan en modo isla. Para este estudio se considera como carga a los transformadores instalados sobre los alimentadores del sistema de distribución, ya que según la duración de los cortes de suministro y cuando la carga no es alimentada aumenta la Pérdida de Energía No Facturada.

Esta sección fue realizada mediante la colaboración de la concesionaria para la obtención de datos reales y se estudió los *softwares* mencionados a través de manuales del usuario y de tutoriales para poder extraer las informaciones necesarias del sistema de distribución expuesto.

## 4.2 MÉTRICAS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ESTUDIADO

Las métricas utilizadas por la concesionaria son (ANDE, 2020): (i) La duración de los cortes de suministro que es la Duración Equivalente de Potencia (DEP); (ii) Las veces del corte es la Frecuencia Equivalente de Potencia (FEP) y (iii) Para la pérdida económica es la Pérdida de Energía No Facturada (PENF). Las fórmulas utilizadas para los cálculos son las siguientes:

$$DEP = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times T_i)}{\text{Pot. instalada}_{\text{Total}}} \quad (3.1)$$

$$FEP = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i)}{\text{Pot. instalada}_{\text{Total}}} \quad (3.2)$$

$$PENF = \sum_{i=1}^{i=n} [(P_i \times t_i) \times FP \times FU] \times C_e \times (1-PT) \quad (3.3)$$

FP = Factor de Potencia = 0,8 definida por la concesionaria.

FU = Factor de Utilización= 0,6, es definida por la concesionaria.

Ce = Costo de energía eléctrica = 400 Gs (guaraníes), equivalente a \$ 0,057 Dólares Americanos, correspondiente a la cotización del día 20/03/2022.

PT = Pérdidas técnicas de los transformadores = 7%, definida por la concesionaria.

Pi = Potencia interrumpida.

ti = Tiempo de interrupción.

La Duración Equivalente de Potencia corresponde al indicador del corte de suministro en el sistema de distribución de la concesionaria hasta el restablecimiento de la energía eléctrica. Este corte es por equivalente de potencia, quiere decir por el tramo de alimentador acorde a la potencia instalada sobre el mismo (ANDE, 2020).

La Frecuencia Equivalente de Potencia es la cantidad de veces que hubo corte de suministro eléctrico por causas: ambientales, producción o programado (ANDE, 2020) y la Pérdida Energía No Facturada corresponde al valor estimado de la pérdida económica de la concesionaria por no haber suministrado energía eléctrica (ANDE, 2020). Para calcular el valor de PENF el Centro de Operación de Distribución del Este de la concesionaria, utiliza la duración de los cortes de suministro, la potencia interrumpida y un valor global de costo de energía eléctrica.

## 5 RESULTADOS OBTENIDOS

Este capítulo aborda el análisis de confiabilidad de diez alimentadores de la subestación Alto Paraná, con el propósito de cumplir los objetivos planteados y detallados en metodología. Se analizó el comportamiento de fallas históricas registrados en los años 2020 y 2021, mediante el Método de Índices y del Método de *Weibull*. Considerando los resultados obtenidos se realizó una comparación de la confiabilidad.

Al mismo tiempo, se proyecta la predicción de la duración de corte de suministro a través del Método T de *Student* con la hipótesis que el año 2022 duraría el doble de tiempo las interrupciones en comparación al año 2021 o al menos el 20% del valor del 2021. También, a través del Método de Regresión Lineal Simple se predice cuál sería la duración del corte de suministro en el 2022, 2023 y 2024.

### 5.1 MÉTRICAS DE LA RED ELECTRICA DE DISTRIBUCIÓN

En esta sección se presenta los resultados obtenidos durante dos años, 2020 y 2021. Este estudio se realizó con el objeto de obtener información de la duración y veces en que la energía eléctrica no fue suministrada. También se comparó los valores entre años. De la misma manera, se presentan resultados de la Pérdida de Energía No Facturada.

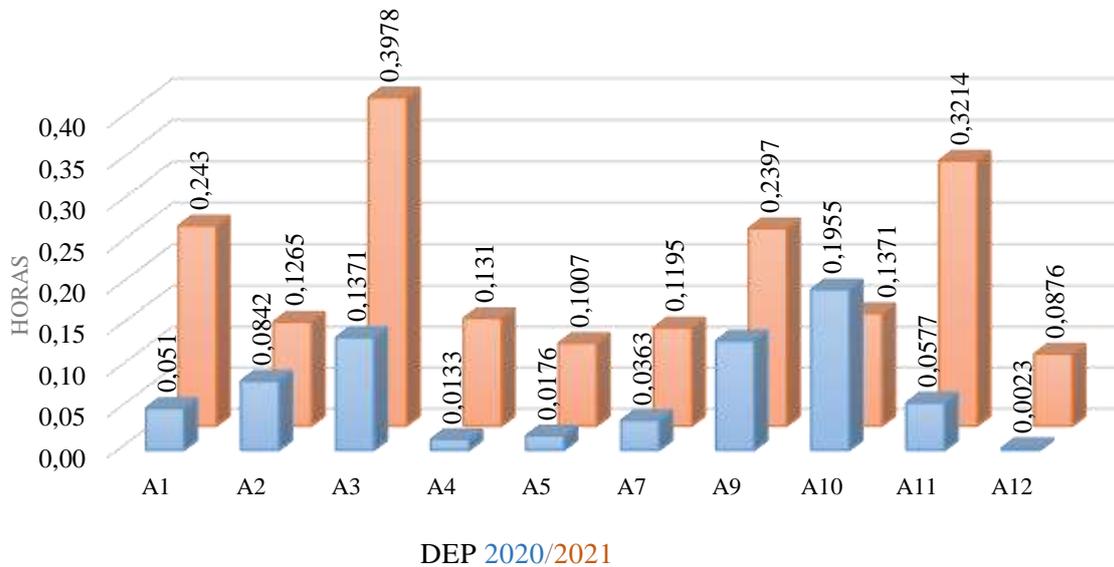
#### 5.1.1 Duración Equivalente De Potencia

La DEP, es obtenida por cada alimentador, procesada en una planilla en la concesionaria y de dicho registro se elaboró un resumen de los años 2020 y 2021 para una mejor comprensión. Este índice es el resultado del tiempo total en que de forma anual cada unidad de potencia estuvo fuera de servicio, no necesariamente de forma simultánea. DEP es un índice de cálculo por potencia, quiere decir, estima un tiempo para un valor de kW en un tiempo determinado. En el año 2020 se registró un tiempo de 1,0061 hora (una hora y sesenta y un centésima de segundos) de fuera servicio del sistema. Sin embargo, en el año 2021 se registró un total de 2,0383 horas (dos horas y 38 segundos). Aumentando considerablemente el 100% del valor del año anterior.

La Duración Equivalente de Potencia aumentó en el 2021 en la mayoría de los alimentadores, se registró cortes por causa accidental, programadas y de mejoras, es por ello que el valor de DEP aumentó. En la Figura 14 puede observarse la presentación de los datos

de DEP de los alimentadores mencionados, cabe destacar que están señalizados doce alimentadores, pero el alimentador ocho y seis no figuran en los análisis porque no poseen carga instalada. El análisis corresponde a los datos del año 2020 y el año 2021.

Figura 14: Representación de DEP 2020/2021.



Fuente: La autora, (2022).

En el año 2020 los registros de mayor número de DEP corresponde al alimentador diez y se debió al primario fuera de servicio y a mejoras introducidas en la subestación. El primario fuera de servicio la concesionaria considera una maniobra en la subestación, cuando existe una falla temporal de uno a tres minutos, tiempo establecido por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE, 2020) para este tipo de falla.

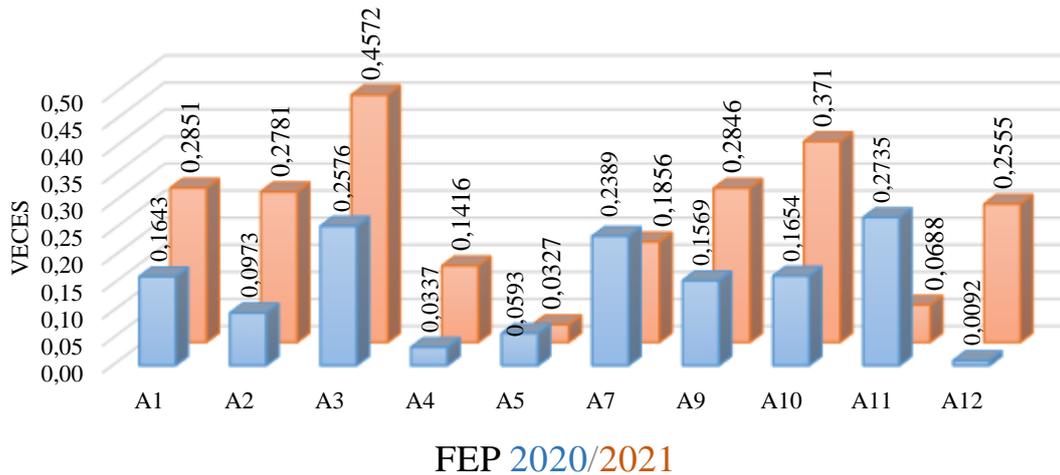
En el año 2021 el alimentador tres es el que más tiempo estuvo fuera de servicio, se debe gran parte de los tiempos al primario fuera de servicio y corte programado. El corte programado con más tiempo fue en el mes de marzo del 2021, corresponde después de una condición climática adversa, también se registró la duración accidental a causa del temporal mencionado.

### 5.1.2 Frecuencia Equivalente De Potencia

El alimentador once es el alimentador que más frecuencia sufrió una interrupción del suministro eléctrico en el año 2020. Las causas principales fueron el primario fuera de servicio (a causa de fallas temporarias) y cortes programados. El alimentador con más veces

fuera de servicio en el 2021 es el alimentador tres, que también se debe a las mismas causas que es el primario fuera de servicio, como así corte programado. En el año 2020 se registraron 1,456 veces el corte de suministro y en el 2021 aumentó a 2,36 veces. Esta diferencia puede observarse en la Figura 15.

Figura 15: Representación gráfica de FEP 2020/2021



Fuente: La autora, (2022).

La Frecuencia Equivalente de Potencia es la frecuencia o veces que el sistema no suministró energía eléctrica, según el análisis pasan de la unidad (1) en el año 2020, sin embargo, en el año 2021 aumentó a 2,36 veces. Debido en gran parte al primario fuera de servicio y corte programado.

### 5.1.3 Pérdida De Energía No Facturada

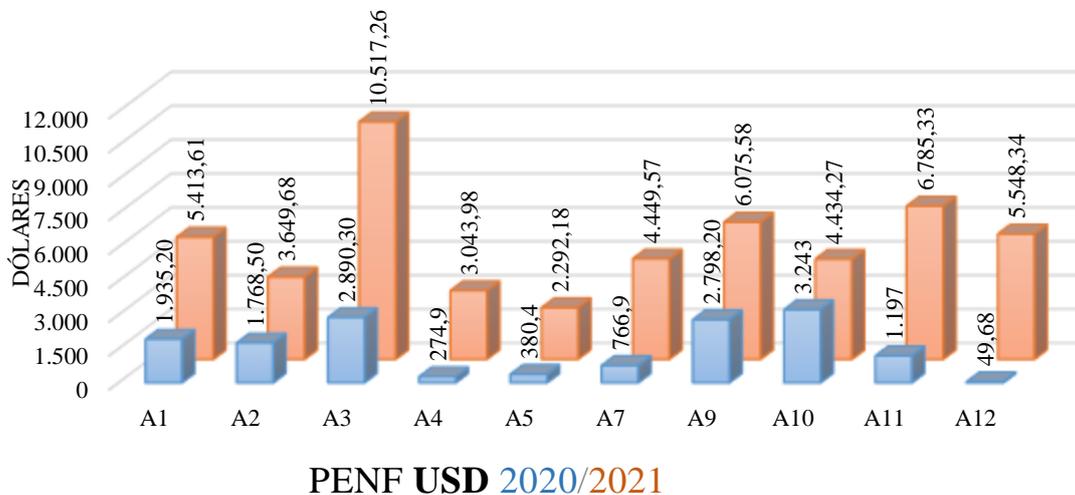
La Pérdida de Energía No Facturada es una consecuencia directa de la duración del corte de suministro eléctrico, a más tiempo sin energía eléctrica, PENF aumenta, por ello es importante estudiar los valores de DEP, las causas de los cortes.

En el año 2020, el alimentador diez fue la línea con mayor pérdida económica con un total de 3.243,19 USD debido a una inversión como mejora en la subestación. En el año 2021 el alimentador tres registró un total de 10.517,26 USD, las causas fueron corte programado y accidental.

En la comparativa de dichos años se tiene la Figura 16, en la que puede observarse que en el año 2021 es el tiempo en la que hubo más pérdida económica totalizando 52.209,04

USD frente al año anterior el 2020 una pérdida de 15.304,58 USD.

Figura 16: Representación gráfica de PENF 2020 y 2021



Fuente: La autora, (2022).

De los datos presentados, en los casos de DEP, FEP y PENF se tiene en común que el año 2021 es el periodo de tiempo en que se registró más duración del corte de suministro esto se debe gran parte a cortes programados y mejoramiento de la estructura de la SSEE en estudio, una consecuencia de la duración de los cortes es el aumento de PENF. Igualmente se registró la causa principal de los cortes, el primario fuera de servicio, este tipo de corte de suministro tiene como una de sus características periodos de tiempo cortos y no se conoce la causa exacta de corte, pero es la causa principal de FEP.

## 5.2 EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

En esta sección se presentan los resultados del análisis de confiabilidad, de esa manera evaluar la confiabilidad del sistema de distribución acorde a la relación en frecuencia FEP y tiempo de duración de los cortes de suministro DEP. Primeramente, se presenta el Método de Índices calculados acorde a la IEEE 1366, en secuencia el análisis a través del Método de *Weibull*.

### 5.2.1 Método De Índices

Este método utiliza la frecuencia de las fallas es por ello que, se presenta las causas principales del corte de suministro, con el objetivo de realizar una comparación, en la cantidad de veces de un tipo de falla y la falla total del sistema (Tabla 7).

Tabla 7: Causas corte suministro 2020 y 2021.

Meses	2020										2021										
	Primario Fuera de Servicio	Línea MT convencional	Seccionador de Línea Aérea	Seccionador de fusible	Abierto	Cruceta Rota	Sostén averiado	Puente MT suelto	Ramas sobre líneas	Duración horas	Meses	Primario Fuera de Servicio	Línea MT convencional	Seccionador de Línea Aérea	Seccionador de fusible	Abierto	Cruceta Rota	Sostén averiado	Puente MT suelto	Ramas sobre líneas	Duración horas
1	10	5	0	0	0	0	0	0	0	16	1	20	2	1	3	2	0	0	0	0	18
2	9	3	0	0	0	0	1	0	0	10	2	7	1	0	0	1	2	0	3	0	12
3	5	1	1	0	0	2	0	3	1	3,6	3	6	2	0	0	1	0	0	0	0	27
4	7	0	0	0	2	0	2	2	2	4,5	4	4	1	0	1	1	0	0	0	0	18
5	6	1	0	0	1	1	3	3	3	5	5	8	0	2	0	0	0	0	0	1	12
6	2	1	0	0	2	0	0	2	1	4,5	6	3	0	0	1	0	0	1	0	0	14
7	2	0	0	0	1	0	0	0	0	11	7	5	0	0	0	0	0	0	0	0	3,5
8	3	0	0	1	0	0	0	1	4	9	8	9	0	0	0	0	1	0	0	0	9
9	8	0	0	0	1	0	0	0	0	3,5	9	7	1	0	1	0	0	0	0	1	7,5
10	8	0	0	0	3	0	0	0	0	13	10	29	3	0	1	0	1	3	1	0	15
11	3	1	0	2	0	1	0	1	1	4,5	11	10	0	0	0	2	0	0	0	0	8
12	9	2	1	1	3	0	0	0	1	8,9	12	8	0	0	0	0	0	0	2	0	21
Σ	72	10	2	4	13	4	6	12	13	84	Σ	95	10	3	7	5	5	5	4	4	165

Fuente: La autora, (2022).

De la tabla anterior puede observarse que el primario fuera de servicio es la causa principal de la frecuencia de cortes, es el 52, 94% de causa de corte de suministro en el 2020, del total de 136 cortes, 72 corresponde a este tipo de falla y en el 2021 el 68,84% del total de 138 cortes, 102 corresponden a la misma causa.

Entonces para el estudio del sistema se determina la tasa de falla para el año 2020 ( $\lambda_{20}$ ) y para el año 2021 ( $\lambda_{21}$ ) en las ecuaciones (5.1) y (5.2) se realizan los cálculos de la tasa de falla donde se calcula en horas total del periodo medido que es un año 8760 horas menos las horas falla del sistema durante ese periodo (84 horas en el 2020 y 165 horas en el 2021, Tabla 6) sobre las veces o frecuencia en que el sistema sufrió un corte de suministro en el mismo periodo medido (136 veces en el 2020 y 138 veces en el 2021). A seguir, se obtiene la tasa de reparación ( $\mu_{20}/\mu_{21}$ ) y la confiabilidad de forma anual (5.3) y (5.4) y por último la confiabilidad del sistema en (5.5) y (5.6). Para el análisis de confiabilidad se utilizó datos en horas y veces de salida de cada alimentador de la SSEE Alto Paraná por cortes accidentales, no programados.

$$\lambda_{20} = \frac{\text{Tiempo de operación sin fallas}}{\text{Número total de fallas registradas}} = \frac{8760 \text{ horas} - 84 \text{ horas}}{136 \text{ fallas}} = 63,79 \frac{\text{horas}}{\text{fallas}} \quad (5.1)$$

$$\lambda_{21} = \frac{\text{Tiempo de operación sin fallas}}{\text{Número total de fallas registradas}} = \frac{8760 \text{ horas} - 165 \text{ horas}}{138 \text{ fallas}} = 62,28 \frac{\text{horas}}{\text{fallas}} \quad (5.2)$$

$$\mu_{20} = \frac{\text{Tiempo acumulado de no operación}}{\text{Número total de fallas}} = \frac{84 \text{ horas}}{136 \text{ fallas}} = 0,61 \frac{\text{horas}}{\text{fallas}} \quad (5.3)$$

$$\mu_{21} = \frac{\text{Tiempo acumulado de no operación}}{\text{Número total de fallas registrado}} = \frac{165 \text{ horas}}{138 \text{ fallas}} = 1,19 \frac{\text{horas}}{\text{fallas}} \quad (5.4)$$

$$\% \text{Confiabilidad}_{20} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{63,79}{63,79 + 0,61} = 99,05\% \quad (5.5)$$

$$\% \text{Confiabilidad}_{21} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{62,28}{62,28 + 1,19} = 98,12\% \quad (5.6)$$

Con este método el sistema eléctrico estudiado posee un alto grado de confiabilidad de acuerdo los resultados obtenidos según la indisponibilidad del sistema en comparación al número total de horas de servicio. En la Tabla 8 es detallado la confiabilidad por alimentador.

Tabla 8: Confiabilidad de los alimentadores.

Alim.	Año	Duración hr.	Diferencia hr.	Confiabilidad %	Diferencia %
A <sub>1</sub>	2020	6,23	0,99	99,92	0,01
	2021	7,22		99,91	
A <sub>2</sub>	2020	9,77	7,43	99,88	0,08
	2021	17,9		99,80	
A <sub>3</sub>	2020	27,9	37,3	99,68	0,43
	2021	65,2		99,25	
A <sub>4</sub>	2020	9,71	29,29	99,89	0,27
	2021	38,92		99,62	
A <sub>5</sub>	2020	2,89	1,25	99,97	0,02
	2021	3,85		99,95	
A <sub>7</sub>	2020	1,75	0,81	99,98	0,01
	2021	2,53		99,97	
A <sub>9</sub>	2020	3,95	0,02	99,96	0,01
	2021	3,93		99,95	
A <sub>10</sub>	2020	11,93	4,73	99,87	0,06
	2021	16,73		99,81	
A <sub>11</sub>	2020	6,79	0,78	99,96	0,01
	2021	7,55		99,95	
A <sub>12</sub>	2020	4,25	1,68	99,95	0,02
	2021	2,57		99,97	

Fuente: La autora, (2022).

La confiabilidad de los alimentadores tiene un alto valor, debido que la duración de las fallas en hora confrontado al número total de operación durante el periodo medido en horas en un año, por ejemplo, el alimentador con más duración de cortes de suministro y el menos confiable es el alimentador tres con 65 horas fuera de servicio, pero su tiempo de operación fue de 8695 de 8760 horas. Mencionado en el referencial teórico, la desventaja de este método es que la confiabilidad está en función de la disponibilidad del total de tiempo estudiado y las veces. Para que tenga un bajo valor de confiabilidad tiene que tener un alto valor de indisponibilidad, más de 1.000 horas al año

En vista a lo expuesto, considerando la duración de las fallas, se propone otro modelo de evaluación de confiabilidad que es el Modelo de *Weibull*, un modelo ampliamente aceptado en el sector eléctrico y se demuestra en la siguiente sección.

### 5.2.2 Modelo De *Weibull*

En esta sección se halla primeramente como ejemplo la confiabilidad del alimentador siete en el año 2020, se ejemplifica el alimentador siete porque es el primer alimentador calculado porque tiene menor valor de corte de suministro y en la tabla de *Weibull* se relacionan los cortes de menor a mayor. Dado el primer paso para la construcción de la Tabla de *Weibull* para la obtención del gráfico de la función se tiene la ecuación (5.7) el cálculo de los rangos medianos en función al tiempo.

$$RM(t) = \frac{i + 0,3}{n + 0,4} = \frac{1 + 0,3}{12 + 0,4} = 0,10 \quad (5.7)$$

El paso siguiente es calcular la función logarítmica a través del logaritmo neperiano  $\ln$  en función del tiempo para  $x$  en la ecuación (5.8) y de la confiabilidad en el eje  $y$  en la ecuación (5.9).

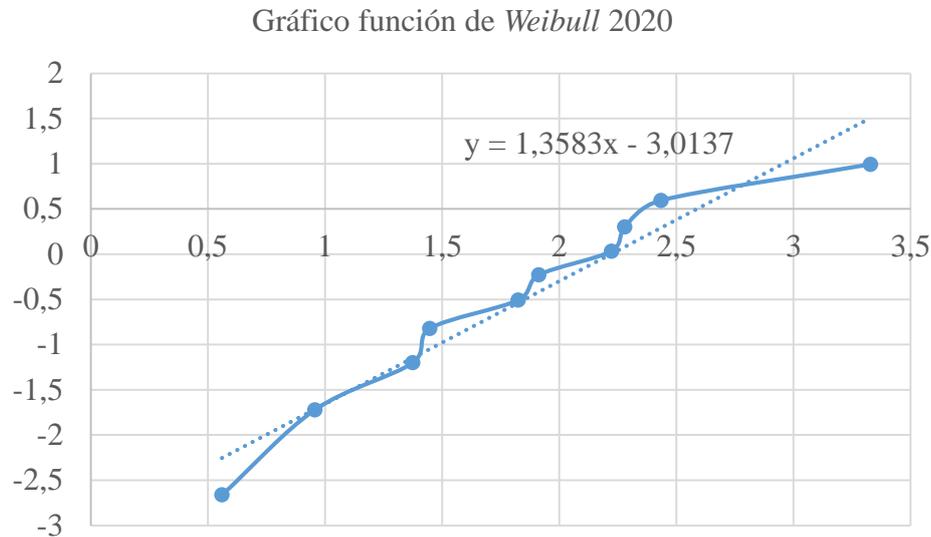
$$x_1 = \ln(1,75) = 0,55 \quad (5.8)$$

$$y_1 = \ln(-\ln R) = \ln\{-\ln * (1-0,10)\} = -2,66 \quad (5.9)$$

Al obtener las ecuaciones de las funciones se proyecta en la planilla de *excel* a través de una gráfica de dispersión, se grafica la función  $x$  e  $y$  (Figura 17). Se agrega la línea de tendencia del gráfico y se obtiene el valor de beta como el de la constante. El valor de la ecuación es en (5.10):

$$y = 1,35x - 3,01 \quad (5.10)$$

Figura 17: Gráfico de función de Weibull del año 2020.



Fuente: La autora, (2022).

A través del gráfico donde figura los diez alimentadores analizados se puede obtener la etapa de desgaste de beta  $\beta$  que es el parámetro que determina si el sistema está en etapa de desgaste inicial, fallas aleatorias o deterioro (5.11) también se obtiene la constante en la ecuación (5.12).

$$\beta = 1,38 \quad (5.11)$$

$$\text{cte} = -3,07 \quad (5.12)$$

El sistema se encuentra en etapa de desgaste o deterioro ya que el valor de beta supera a 1, en este caso es de 1,38. Para el cálculo de confiabilidad se obtiene el valor de beta a partir de las duraciones del corte de suministro y de la relación de dichos datos se obtiene el valor de beta, destacando que se utiliza para calcular el método solamente las horas por corte accidental, el método no considera mejoras de estructuras etc., sino a partir de los datos del corte de suministro entre un año y otro. Al obtener estos valores, se calcula el valor de eta  $\eta$  (5.13) que será utilizada en la ecuación general de confiabilidad que está definida en (5.14).

$$\eta = \exp\left(\frac{\text{Cte}}{\beta}\right) = \exp\left(\frac{3,07}{1,38}\right) = 128,38 \quad (5.13)$$

$$R(tA_7) = \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{n} \right)^\beta \right] = \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{1,75}{128,38} \right)^{1,38} \right] \right\} * 100 = 99,73\% \quad (5.14)$$

El valor de la confiabilidad del ejemplo que tiene al alimentador siete con una duración de 1,75 horas fuera de servicio es del 99,73%, también demuestra un alto valor de confiabilidad como el método anterior debido a la poca duración en horas. Seguido mismos pasos demostrados, se halla la confiabilidad por el Método de *Weibull* en los demás alimentadores.

En la siguiente Tabla 9 puede observarse los valores de confiabilidad obtenidos por el Método de *Weibull* correspondientes a los años 2020/2021. También puede observarse la diferencia porcentual entre ambos periodos.

.Tabla 9: Confiabilidad de *Weibull* 2020 y 2021.

Alim.	Año	Duración hr	Diferencia hr.	Confiabilidad %	Diferencia %
A <sub>1</sub>	2020	6,23	0,99	98,48	0,35
	2021	7,22		98,13	
A <sub>2</sub>	2020	9,77	7,43	97,18	3,33
	2021	17,2		93,95	
A <sub>3</sub>	2020	27,9	37,3	88,54	21,01
	2021	65,2		67,53	
A <sub>4</sub>	2020	9,23	29,29	97,39	14,67
	2021	38,52		82,72	
A <sub>5</sub>	2020	2,6	1,25	99,54	0,3
	2021	3,85		99,21	
A <sub>7</sub>	2020	1,75	0,81	99,73	0,17
	2021	2,53		99,56	
A <sub>9</sub>	2020	3,95	0,02	99,18	0,02
	2021	3,93		99,20	
A <sub>10</sub>	2020	11,4	4,73	96,52	2,01
	2021	16,13		94,51	
A <sub>11</sub>	2020	6,77	0,78	98,29	0,27
	2021	7,55		98,02	
A <sub>12</sub>	2020	4,25	1,68	99,10	0,45
	2021	2,57		99,55	

Fuente: La autora, (2022).

Entonces, se puede demostrar efectivamente que la confiabilidad disminuye en el 2021 en comparación que el 2020 en la mayoría de los alimentadores, los mismos

alimentadores con más veces y más duración son los menos confiables como también se obtuvo como resultado en el Método de Índices.

Con el fin de comparar los métodos estudiados se presenta en la Tabla 8 la diferencia entre ambos y se observa que la comparación de confiabilidad en el último periodo disminuyó. Además, puede compararse con lo expuesto, por ejemplo, el alimentador tres, en el año 2021 es la línea con más corte de suministro eléctrico y en ambos métodos es el menos confiable. Los periodos más largos de corte de suministro se deben a los cortes accidentales a causa de días lluviosos y descargas atmosféricas según los registros del Centro de Operación de Distribución del Este.

La diferencia porcentual de la confiabilidad de los alimentadores de los años 2020 y 2021 se expresa gráficamente de los valores de la Tabla 10.

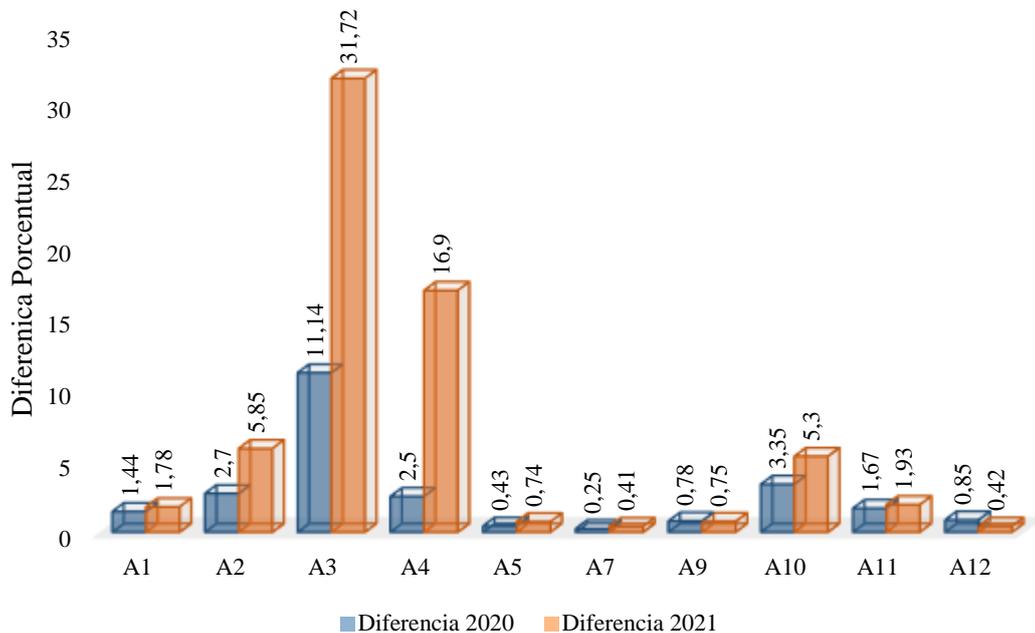
.Tabla 10: Comparación de confiabilidad.

Alim	2020		Diferencia 2020	2021		Diferencia 2021
	Índices	Weibull		Índices	Weibull	
A <sub>1</sub>	99,92	98,48	1,44	99,91	98,13	1,78
A <sub>2</sub>	99,88	97,18	2,7	99,80	93,95	5,85
A <sub>3</sub>	99,68	88,54	11,14	99,25	67,53	31,72
A <sub>4</sub>	99,89	97,39	2,5	99,62	82,72	16,9
A <sub>5</sub>	99,97	99,54	0,43	99,95	99,21	0,74
A <sub>7</sub>	99,98	99,73	0,25	99,97	99,56	0,41
A <sub>9</sub>	99,96	99,18	0,78	99,95	99,20	0,75
A <sub>10</sub>	99,87	96,52	3,35	99,81	94,51	5,3
A <sub>11</sub>	99,96	98,29	1,67	99,95	98,02	1,93
A <sub>12</sub>	99,95	99,10	0,85	99,97	99,55	0,42

Fuente: La autora, (2022).

En la tabla anterior se nota claramente la diferencia porcentual entre ambos métodos y como la confiabilidad disminuye acorde a los métodos empleados, por ejemplo el alimentador tres en el año 2021 tiene una duración de 65,2 horas de corte de suministro y en el método de índices tiene una alta confiabilidad en vista a las horas total disponibles, sin embargo, en el método de *Weibull* relaciona los valores de duración de cortes de suministro con los otros alimentadores y se obtiene una confiabilidad de nada más del 65,73%. Dicha diferencia se puede observar en la Figura 18.

Figura 18: Diferencia gráfica entre métodos de confiabilidad.



Fuente: La autora, (2020).

La diferencia entre ambos en el análisis es que la del Método de Índices utiliza la cantidad y duración de fallas en un tiempo determinado para calcular la confiabilidad. Sin embargo, la del Método de *Weibull* utiliza la duración de las fallas en un tiempo determinado realizando un análisis de duración entre los alimentadores de una muestra dada.

### 5.3 PREDICCIÓN DE DURACIÓN CORTE DE SUMINISTRO

Mediante el Modelo T de *Student* se realizan los cálculos y la demostración para aceptar o rechazar la hipótesis si el 2022 tendrá el doble de corte de suministro accidental en comparación al 2021 en vista que el 2021, fue el doble que en el 2020. Además, se calcula si la duración sería al menos del 20% en el 2021 para el 2022 en el caso de que se rechace la primera hipótesis planteada.

Asimismo, se pretende predecir cuánto será la duración de los cortes en los años 2022, 2023 y 2024 a través del Método de Regresión Lineal Simple. El motivo principal de realizar este estudio es verificar el cálculo de T de *Student*, además de obtener un valor real aproximado y estimado de los cortes de suministro.

#### 5.3.1 Predicción De Duración Corte de Suministro 2022 – T De *Student*

Se proyecta la relación de las variables tiempo de los datos de la duración de cortes

de suministro, en la Tabla 11 puede observarse los datos en la segunda columna corresponde al año 2021 y en la tercera columna corresponde a un aumento del 20% de los datos del año 2021 y en la cuarta columna al doble de los datos.

.Tabla 11: Proyección de duración de cortes para el 2022.

ALIM.	Duración 2021	Duración 2022 +20% (2021)	Duración 2022 =2*(2021)
A <sub>1</sub>	7,22	8,66	21,66
A <sub>2</sub>	17,20	20,64	51,61
A <sub>3</sub>	65,23	78,27	195,69
A <sub>4</sub>	38,50	46,20	115,50
A <sub>5</sub>	3,85	4,62	11,55
A <sub>7</sub>	2,53	3,03	7,59
A <sub>9</sub>	3,90	4,68	11,73
A <sub>10</sub>	16	19,20	48,00
A <sub>11</sub>	7,55	9,06	22,65
A <sub>12</sub>	2,57	3,08	7,71

Fuente: La autora, (2022).

A través de la tabla presentada, primeramente, se calcula el promedio de ambos grupos en las ecuaciones (5.15) y (5.16). Son los valores del promedio del dato del 2021 y del 20% a más del 2021 de la Tabla 10. En el numerador es el promedio de las duraciones de corte de suministro y en el denominador la cantidad de alimentadores que en este caso es diez alimentadores ya que fueron excluidos dos que es el seis y el ocho por no poseer carga.

$$\bar{x}_1 = \frac{16,45}{10} = 1,64 \quad (5.15)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{19,76}{10} = 1,978 \quad (5.16)$$

Para la cantidad de elementos de cada grupo tenemos  $n_1 = n_2 = 10$ , que es la cantidad total de alimentadores en estudio. A seguir, se calcula la varianza muestral en la ecuación a través de la planilla de *excel* con la función *var.s* del grupo uno (414,83) y grupo dos (597,36). Para el cálculo de la varianza común en la ecuación 5.17. También se calcula el estadístico de prueba *t* en la ecuación 5.18. El grado de libertad está definido en la ecuación 5.19. Para valores de alfa se define el 5% que es la tolerancia de aceptar o rechazar la hipótesis planteada (5.20).

$$S_C^2 = \frac{(10-1)*414,83+(10-1)*597,36}{10+10-2} = 506,09 \quad (5.17)$$

$$t = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_C^2}{n_1} + \frac{S_C^2}{n_2}}} = \frac{414,83+597,36}{\sqrt{\frac{414,83}{10} + \frac{506,09}{10}}} = 74,73 \quad (5.18)$$

$$gl = (n_1+n_2-2) = (10+10-2) = 18 \quad (5.19)$$

$$\alpha = 5\% = 0,05 \quad (5.20)$$

Al finalizar se calcula el valor crítico mediante la función inv.t.2c en la ecuación 5.21 a través de la inversa de distribución T de dos colas, porque la prueba de hipótesis es de dos colas. Para la probabilidad del valor, que es la probabilidad de que suceda la hipótesis planteada, se utiliza la función distr.2c entre el valor crítico y los grados de libertad. Para obtener el p-valor en la ecuación 5.22.

$$\text{Valor crítico} = \text{inv.t.2c} \left( \frac{0,05}{18} \right) = 1,83 \quad (5.21)$$

$$\text{p-valor} = \text{distr.2c}(1,83;18) = 0,03 \quad (5.22)$$

En este caso el p-valor resulta menor que el valor de significancia alfa y se rechaza la hipótesis nula de que la cantidad de horas de falla puede aumentar el 20% en el siguiente periodo de medición. Si el p-valor obtuviera un valor mayor al nivel de significancia que es el 5% en este caso 0,05 expresado decimalmente, se aceptaría la hipótesis, en este caso, fue menor y se rechaza la hipótesis.

Cómo el ejemplo anterior y a través de la cuarta columna de la Tabla 9 presentada, se obtienen los promedios de los datos 2021 y 2022 como puede observarse en las siguientes ecuaciones:  $\bar{X}_1 = 1,6$ ;  $\bar{X}_2 = 4,9$ ;  $n_1$  y  $n_2 = 20$ ;  $S_1^2 = 414,83$ ;  $S_2^2 = 3.733,54$ . A seguir se calcula la varianza común en la ecuación (5.23) y el estadístico t en la ecuación (5.24).

$$S_C^2 = \frac{(n_1-1) S_1^2 + (n_2-1) S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = 152,78 \quad (5.23)$$

$$t = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_C^2}{n_1} + \frac{S_C^2}{n_2}}} = -2,55 \quad (5.24)$$

Para el valor crítico con una significancia del 5%: El grado de libertad se obtiene en la ecuación (5.25) y el p-valor en la ecuación (5.26) para el cálculo de la probabilidad que ocurra lo planteado:

$$gl = t \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \times (n_1 + n_2 - 2) = 2,20 \quad (5.25)$$

$$P(T < t) = 0,00025\% \quad (5.26)$$

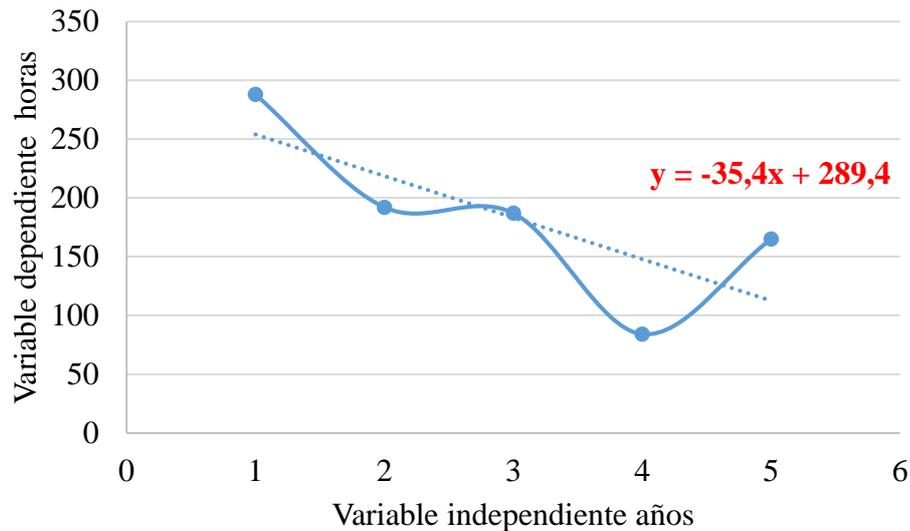
El valor de la prueba de probabilidad que es el 0,00025 al ser menos que el margen de significancia que es el 5% o el 0,05, se rechaza la hipótesis nula, de que en el 2022 los valores de corte de suministro no serán el doble que en el 2021. En la siguiente sección se presenta la predicción de las duraciones a través del Método de Regresión Lineal Simple.

### 5.3.2 Predicción de Duración de Corte de Suministro por Regresión Lineal Simple

A través de este método lo que se busca es tener un valor aproximado de los cortes de suministro accidentales para los años 2022, 2023 y 2024 a través de los datos de duración de cortes de suministro de los años 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021. Igualmente, este método se realiza para contrastar con el método del T de *Student*, ya que rechazó la hipótesis que en el 2022 el valor de las duraciones de corte de suministro no sería el doble que el 2021 y aceptó que las duraciones del corte de suministro aumentarían al menos 20%.

A través de los datos se diseña un gráfico de dispersión introduciendo los valores de las duraciones de corte de suministro de los años 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 como muestra la Figura 19 y se traza una línea de tendencia para obtener la función del gráfico. A través de esta función se hallará los valores en horas de corte de suministro para los siguientes periodos.

Figura 19: Gráfico de regresión lineal simple.



Fuente: La autora, (2022).

Entonces, se tiene que la ecuación de la recta en 5.27 y se reemplaza los valores de  $x$  que son los años en las ecuaciones (5.28) (5.29) y (5.30) y a través de los cálculos se obtiene los valores de  $y$  que es la predicción en horas.

$$y = -35,4x + 289,4 \quad (5.27)$$

$$y_{\text{Duración Año 2022}} = -35,4(5) + 289,4 = 112,14 \quad (5.28)$$

$$y_{\text{Duración Año 2023}} = -35,4(6) + 289,4 = 77 \quad (5.29)$$

$$y_{\text{Duración Año 2024}} = -35,4(7) + 289,4 = 41,6 \quad (5.30)$$

En la Figura 20 puede observarse gráficamente la proyección del pronóstico de la duración de corte de suministro para los años 2022, 2023 y 2024, también se puede comprobar que a partir del método de regresión lineal simple puede estimarse que en el año 2022 sería de 112,14 horas, para el 2023 una duración aproximada de 77 horas y por último para el 2024 de 41,6 horas.

Figura 20: Gráfico de duración de los años 2020, 2021, 2022, 2023, 2024.



Fuente: La autora, (2022).

A través de un valor real obtenido mediante el método de Regresión Lineal Simple ayudaría a la concesionaria obtener un número aproximado del corte de suministro accidental de los próximos 3 años.

También a través de este análisis se demostró que efectivamente el corte de suministro no será el doble en el 2022 en comparación al 2021 como rechazó el método T de *Student* ni tampoco sería el valor del 20% a más en comparación al 2021, disminuiría los valores en un 31,87% del valor del 2021.

## 6 CONCLUSIÓN

Este trabajo se realizó mediante datos reales obtenidos de la concesionaria ANDE y fueron cumplidos satisfactoriamente los objetivos planteados. Se analizaron los informes de los indicadores DEP, FEP y PENF de los años 2020 y 2021. Se realizó un estudio comparativo de los indicadores mencionados.

También se analiza la confiabilidad del sistema de distribución a través de los datos provistos por la concesionaria, del departamento de Centro de Operaciones de Distribución del Este. Para dicho fin se utilizó el Método de Índices obtenidos de la norma IEEE 1366, con valores elevados de confiabilidad, el 98-99%, ya que la confiabilidad está en función de la disponibilidad del total de tiempo estudiado y las veces. Para que tenga un bajo valor de confiabilidad tiene que tener un alto valor de indisponibilidad, más de 1.000 horas al año.

También se calcula la confiabilidad por el Método de *Weibull*, utilizando los valores de duración de cortes de suministro. En este método los porcentajes disminuyó llegando hasta el 67% de confiabilidad, puede decirse que por medio del valor de beta obtenido el sistema estudiado se encuentra en etapa de deterioro inicial.

En conclusión, ambos métodos estudiados presentan sus ventajas y desventajas. La del Método de Índices es de fácil aplicación y realiza la integración de los valores de duración y frecuencia de cortes en las fórmulas para obtener la confiabilidad de un sistema. Sin embargo, la desventaja sería si se tuviera un solo dato, por ejemplo, solo duraciones del corte de suministro, no podría calcularse. El Método de *Weibull* demuestra su ventaja en que a través de los datos puede determinarse en qué etapa de falla se encuentra el sistema: inicial, constante o deterioro, a través de este valor se pueden tomar decisiones en un sistema estudiado, además de que este método puede calcular la confiabilidad del sistema eléctrico solamente teniendo el valor del corte de suministro eléctrico, pero como desventaja tendría que es de aplicación más difícil y debe lograrse la correcta interpretación de los datos.

También se realizó una estimación de la duración del corte de suministro a través del Método T de *Student* presagiar aproximadamente el valor del corte de suministro proponiendo hipótesis que en el año 2022 la duración sería el doble que el 2021, ya que en el 2021 los valores se duplicaron en comparación del 2020, si los datos seguirían esa tendencia. Igualmente se planteó que la duración en el 2022 al menos duraría el 20% a más

que el 2021. En el primer caso, se rechaza la hipótesis y para el segundo caso también se rechaza la hipótesis.

Además, se desea conocer un valor aproximado de la duración del corte de suministro ya que por el Método de T de *Student* se demuestra una probabilidad de acierto. Entonces, se desarrolló a través del Método Regresión Lineal Simple una predicción del valor para el 2022, 2023 y 2024. Para el 2022 disminuyó los valores en un 31% en comparación del valor del 2021. Esto efectivamente demuestra que la hipótesis rechazada que sería al menos el doble o al menos el 20% a más es un resultado acertado.

Mediante los métodos estudiados se obtuvieron los resultados de los objetivos propuestos, finiquitando así que es bastante útil cada caso expuesto y estudiado. La confiabilidad es uno de los factores más importante en la realidad del sistema de distribución, la aplicación de los conocimientos de ingeniería debe optimizar estos valores y puede hacerlo a través del estudio constante del sistema de distribución. Como consideración se propone para trabajos futuros:

- a) Análisis del alimentador con baja confiabilidad y acciones a realizarse para aumentar el grado de confiabilidad.
- b) Estudio de interconexión entre alimentadores en caso de condiciones adversas del clima y un alimentador se encuentra sin energía eléctrica puede acoplarse con otro para disminuir las duraciones de corte de suministro.
- c) Ubicación de equipos sobre la red del sistema de distribución que mejore la continuidad del servicio y aumente la confiabilidad.
- d) Planeación de sistemas interconectados con generación distribuida para aumentar la confiabilidad del sistema en análisis.
- e) Evaluación económica para reducir pérdidas cuya función objetivo sea mejorar la confiabilidad de un sistema de distribución.

Se recomiendan dichas investigaciones porque mediante el análisis de confiabilidad de un sistema se puede demostrar el funcionamiento en base a registros histórico de eventos, además para una gran inversión, en necesario el estudio de la confiabilidad para lograr los resultados deseados en un proyecto de gran porte.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGARWAL, U. et al. **Weibull Distribution Based Reliability Analysis of Radial Distribution System with Aging Effect of Transformer**. 21st National Power Systems Conference (NPSC). Gandhinagar: IEEE. Enero 2021.

ANDE. **Informe Indicadores Continuidad de Servicio**. Administración Nacional de Electricidad. Ciudad de L Este. 2020.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 956 - Anexo 8**. Agencia Nacional de Energía Eléctrica. Brasilia, p. 69. 2021.

ANNEE. **Resolución Normativo Nº 414**. Agencia Nacional de Energía Eléctrica. Brasilia, 2009.

BARBOSA, A. D. S.; SHAYANI, R. A.; GONÇALVES, M. A. D. O. A multi-criteria decision analysis method for regulatory evaluation of electricity distribution service quality. **ELSEVIER**, v. LIII, p. 38-48, 2018.

BERGER, L. T.; INIEWSKI, K. **Redes Eléctricas Inteligentes, Aplicacoes, Comunicacao e Seguranca**. Rio de Janeiro, 2015. ISBN 978-85-216-3008-1.

BIROLINI, A. **Ingeniería de Confiabilidad: Teoría y Práctica**. Octava ed. Berlin: Springer-Verlag, v. 1, 2017.

BIRYULIN, V.; KUDELINA, D.; LARIN, M. **Electricity Quality Problems in the 0.4 kV City Electric Networks**. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi: IEEE. Junio 2020. p. 13.

BOSE, A. **Grid Modernization: Opportunities and Obstacles**. Washington: Office of Electricity U.S. Department of Energy, v. V, 2019. Disponible en: <[https://www.energy.gov/sites/default/files/202105/Grid%20Operations%20Bose%20Overbye\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/202105/Grid%20Operations%20Bose%20Overbye_0.pdf)>. Consultado el: 17 de Enero de 2021.

BROW, R. **Electric Power Distribution Reliability (Power Engineering (Willis))**. Segunda ed.: CRC, 2008. ISBN 978-0849375675.

BRYNN, G. et al. **Method and system to determine the reliability of a network**. US20090096406A1, 30 Agosto 2006. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/US20090096406>>. Consultado el: 23 de Junio de 2022.

CAI, Y. et al. **The method by which the reliability index of the regional distribution network is decomposed**. CN103400306B, 16 Julio 2018. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/CN103400306B>>. Consultado el: 17 de Agosto de 2022.

CRESPO, G. et al. Revisión de la asignación de interruptores en la reconfiguración de redes de distribución para maximizar la confiabilidad y minimizar los costos. **Universidad y Sociedad**, CienFuegos, v. XI, n. 1, Marzo 2019.

DIMOV, G.; TZVETKOVA, S.; LOZANOV, Y. **Influence of the type of electrical distribution network on the indices of continuity of the power supply**. 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BuleF). Varna, Bulgaria: IEEE. 2020. p. 12.

ENSSLIN, L. et al. Processo de análise sistêmica. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. V, n. 2, 2012.

GU, T. et al. **Method and device to dynamically evaluate the reliability of the network**. CN102801568B, 8 Noviembre 2016. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/CN102801568B>>. Consultado el: 17 de Agosto de 2022.

HERRERA, G. ¿Qué tan confiable es tu red eléctrica? Power System Reliability. **Sector Electricidad**, Lima, v. I, n. 1, p. 8, 2 Abril 2017. Disponible en: <<https://www.sectorelectricidad.com/17410>>. Consultado el: 30 de Marzo de 2022.

HUERTA, R. **Proceso de Análisis Integral de Disponibilidad y Confiabilidad como Soporte para el Mejoramiento Continuo de las Empresas**. Realiability World Latin America 2006. Monterrey: Convex. Junio 2006. p. 20.

JUÁREZ CERVANTES, J. D. **Sistemas de distribución de energía eléctrica**. México: Universidad Autónoma Metropolitana, v. I, 1995. Disponible en: <<https://core.ac.uk/download/pdf/48392416.pdf>>. ISBN 970-620-734-1>. Consultado el: 13 de Diciembre de 2019.

KEMABONTA, T.; MOWRY, G. A syncretistic approach to grid reliability and resilience: Investigations from Minnesota. **Elsevier**, Minnesota, Noviembre 2021. Disponible en: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X21001127>>. Consultado el: 21 de Agosto de 2022.

LEVY, A.; CARRASCO, J. J. **Calidad y confiabilidad de los servicios eléctricos en América Latina**. Primera ed. México: Banco Interamericano de Desarrollo, v. I, 2020. Disponible en: <<https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Calidad-y-confiabilidad-de-los-servicios-electricos-en-America-Latina.pdf>>. Consultado el: 21 de Enero de 2021.

- MACHADO, E. D. A.; FIGUEIRÔA, C. L. S. F.; DA COSTA, G. L. Machine Learning and q-Weibull Applied to Reliability Analysis in Hydropower Sector. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, v. VIII, 2020.
- MAYKOT, A.; ARANHA, E.; OLIVA, N. **Automation of Manual Switches in Distribution Networks Focused on Self-Healing: A Step toward Smart Grids**. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America). Gramado, Brazil: IEEE. 2019.
- MIHAI, C.; HELEREA, E. **Reliability and Continuity Indicators Estimation in System of Electrical Power Supply to the Consumer**. 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Cluj, Romania: IEEE. Mayo 2019.
- MURRAY, S.; STEPHENS, L. **Estadística Shaum**. Sexta ed. Mexico: Mc Graw Hill, 2009. ISBN: 9786071514639.
- NASLE, A.; ADIB, N. **Sistemas y métodos para el monitoreo predictivo que incluyen análisis de fuerza y seguridad en tiempo real en un sistema de distribución de energía eléctrica**. US9031824B2, 10 Marzo 2010. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/US9031824>>. Consultado el: 23 de Setiembre de 2022.
- PEREIRA, A. **Análisis predictivo de datos**. Primera ed. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, v. I, 2010. Disponible en: <[https://eprints.ucm.es/id/eprint/11389/1/Analisis\\_Predictivo\\_de\\_Datos.pdf](https://eprints.ucm.es/id/eprint/11389/1/Analisis_Predictivo_de_Datos.pdf)>. Consultado el: 30 de Julio de 2022.
- PETLESHKOV, A.; LOZANOV, Y. **Analysis of the interruptions in a section of power distribution network medium voltage 20 kV**. 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). Varna, Bulgaria: IEEE. Julio 2019.
- PING-CHEN, C.; DING-HSIANG, H.; LANCE, F.-K. L. Method for integrating classical and network reliability: A time varying network reliability evaluation. **Quality and Reliability Engineering International**, Texas, v. XXXV, n. 6, p. 2953-2967, Junio 2021.
- PRABIR, S.; TRENT, A. M. **Enhanced grid reliability through predictive analysis and dynamic action for stable power distribution**. SG10201607695YA, 15 Marzo 2013. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/SG10201607695YA>>. Consultado el: 17 de Enero de 2021.
- RONG, Y. et al. **A kind of Distribution Network Reliability determination methods based on probability distribution**. CN104376504B, 11 Agosto 2012. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/CN104376504B>>. Consultado el: 30 de Julio de 2022.

SÁNCHEZ, M. A. **Calidad de la Energía Eléctrica**. Primera ed. Puebla: SNTC, v. I, 2009.

SEGURA, R. **Evaluación metodológica de confiabilidad para mejorar el desempeño de los sistemas eléctricos de distribución de la subestación San Francisco-Ayacucho**. Primera ed. Ayacucho: Universidad Nacional del Centro de Perú, v. I, 2021.

SHIH, M. et al. Desarrollo del algoritmo genético heurístico para la coordinación de protecciones. **Revista de Ingeniería Eléctrica**, México, v. IV, n. 12, Junio 2020.

SOLÍS, C.; ARCOS, H. **Planificación de Redes Eléctricas de Distribución en Zonas Urbanas Consolidadas Considerando Criterios de Confiabilidad**. Primera ed. Quito: Escuela Politécnica Nacional, v. I, 2018. Disponible en: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19398/1/CD-8788.pdf>>. Consultado el: 22 de Enero de 2021.

TAPIA, C. L. **Estudio de confiabilidad en los alimentadores de la subestación Cayambe**. Cayambe. Ecuador: v. 1, 2019. Disponible en: <<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8866>>. Consultado el: 21 de Julio de 2022.

TOFANI, A. et al. Operational Resilience Metrics for Complex Inter-Dependent Electrical Networks. **Applied Sciences**, Roma, v. 11, n. 13, p. 25, Junio 2021. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/13/5842>>. Consultado el: 19 de Agosto de 2022.

VENDITTI, P. et al. **System and methods for control reliability operations**. US9218233B2, 24 Julio 2014. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/US9218233B2>>. Consultado el: 21 de Setiembre de 2022.

VINUESA, P. **Regresión lineal simple y polinomial: teoría y**. Tercera. ed. Cuernavaca: UNAM, v. VII, 2016.

YANG, J.; WU, S.; ZHAO, Y. **A kind of Series System Reliability confidence lower limit method of estimation of exponential distribution**. CN103218533B, 22 Abril 2013. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/CN103218533B>>. Consultado el: 17 de Setiembre de 2022.

YASER, F.; AZRIYENNI, D.; SUKMA, Y. Valuation of Reliability Index in Distribution Network 13.8 kV. **Journal of Science and Applied Engineering**, v. III, n. 1, Mayo 2020.

ZHAO, Y. et al. **A type of distribution network reliability determination methods based on probability distribution**. CN102968556B, Setiembre Noviembre 2015. Disponible en: <<https://patents.google.com/patent/CN102968556B>>. Consultado el: 15 de Setiembre de 2022.

---

ZHEN, Y. et al. **Failure Rate Adjustment for Power Grid Reliability Analysis.**  
US20040167731A1, 23 Diciembre 2013. Disponible en:  
<<https://patents.google.com/patent/US20040167731>>. Consultado el: 17 de Setiembre de  
2022.

.

## APÉNDICE

Para realizar los cálculos de la duración de suministro fue posible gracias a la colaboración de la Administración Nacional de Electricidad mediante el Centro de Operación de Distribución del Este – CODE.

En el departamento diariamente se computa en los registros los acontecimientos que suceden la subestación, como ejemplo se muestra la Figura 21, que corresponde al día jueves 17 de octubre del 2019 donde puede observarse que en la madrugada a las 3:30 horas disparó el interruptor del alimentador 12 y es cerrado 13 minutos después, entonces siendo computado los trece minutos al alimentador correspondiente en ese día.

Figura 21: Ejemplo parte diaria de la SSEE APR.



Fuente: La autora, (2022).

También en ese día hay otro acontecimiento que es el excluido recierre que significa se prescinde el recierre del reconector para trabajar en línea viva sobre el alimentador 4 por diez horas y cinco minutos, durante ese tiempo, no se desconecta al alimentador, sigue energizado y los usuarios no sienten una falta de suministro, en la Figura 22 puede observarse que para excluir o incluir la acción de un reconector es a través de un botón en la sala de comando de la SSEE. En este caso el recierre del alimentador dos se encuentra excluido.

Figura 22: Botón de inclusión/exclusión alimentador dos.



Fuente: La autora, (2022).

Las duraciones de corte de suministro fueron anotadas en una planilla de *excel* primero día a día, para luego realizar un resumen de forma mensual como muestra la siguiente Tabla

Tabla 12: Duración corte de suministro año 2020.

DURACIÓN DE CORTE DE SUMINISTRO ELÉCTRICO EN ALIMENTADORES - 2020														
ALIM.	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total minutos	Total horas
	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.		
A <sub>1</sub>			18		23		67	135		125		4	372	6,2
A <sub>2</sub>	62	8			162	104	33		37	180			586	9,767
A <sub>3</sub>	283	288	93	85	29	45	373	205	2	57	143	68	1671	27,85
A <sub>4</sub>	158	128	42		14	19	98	8	11	13	21	42	554	9,233
A <sub>5</sub>	18	54	9						75				156	2,6
A <sub>7</sub>	42			18	10				35				105	1,75
A <sub>9</sub>	25	42	14	3		43			30			80	237	3,95
A <sub>10</sub>	59		13	129	60		3	170	9	98	101	40	682	11,37
A <sub>11</sub>	197	62	23	14		3	45	19		41	2		406	6,767
A <sub>12</sub>	125	28	6	19		56	12		9				255	4,25

Fuente: La autora, (2022).

De la misma manea se realizó la planilla de la Tabla 23 que corresponde al registro diario del año 2021.

Tabla 13: Duración corte de suministro año 2021.

DURACIÓN DE CORTE DE SUMINISTRO ELÉCTRICO EN ALIMENTADORES - 2021														
ALIM.	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total minutos	Total horas
	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.	Min.		
A <sub>1</sub>			79		23		67	135		125		4	433	7,217
A <sub>2</sub>	8	22	485		162	104	33		37	180			1031	17,18
A <sub>3</sub>	177	480	156	119	231	250	373	205	372	872	282	395	3912	65,2
A <sub>4</sub>	126	132	49		14	240	129	320	186	335	458	321	2310	38,5
A <sub>5</sub>	17	107	32						75				231	3,85
A <sub>7</sub>				18	10				35	40	32	16	151	2,517
A <sub>9</sub>		43	35	3		43			30			80	234	3,9
A <sub>10</sub>	85	61	45	129	60	45	45	170	21	98	101	100	960	16
A <sub>11</sub>	32	16	61	35		72	45	19	71	65	35		451	7,517
A <sub>12</sub>		13	45	19		56	12		9				154	2,567

Fuente: La autora, (2022).