



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



**“EVALUACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD
MEDIANTE LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE EQUIPOS DE
PROTECCIÓN Y SECCIONAMIENTO EN LOS
ALIMENTADORES DE 10KV DEL SISTEMA ELÉCTRICO
YARADA, TACNA”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. NICOL NINGERSON MOLINA COAQUIRA

Bach. GRACIAN WILBER PILCO ACHO

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

PUNO – PERÚ

2021



DEDICATORIA

A mis padres, (Nicanor y Clara) A quienes va dedicado con todo mi amor, por darme la vida, cuidar de mí en la infancia y por sus enormes sacrificios que hicieron por darme una buena educación.

A mi pareja de vida, (Erika) Con todo amor, te lo dedico, porque fuiste la persona que me impulsó a realizar esta investigación a la brevedad posible.

A mis hermanos, (Yefry y Meliza) Con todo cariño esta investigación se las dedico a ustedes también, porque siempre me apoyaron y me dieron buenos consejos para superar los momentos más críticos de mi vida.

A mi hijo, (Thiago) Con todo el aprecio que siento hacia ti, te lo dedico, porque eres mi motivo de superación.

Nicol Ningerson Molina Coaquira



DEDICATORIA

A dios, por darme la salud y bendición para alcanzar mis metas como persona y como profesional.

A mis abuelitos (Nicanor y Genara), quienes fueron mi principal fuente de apoyo, por impulsarme al estudio y por su inmensa preocupación.

A mi padre (Pedro) y a mi difunta madre (Francisca), por darme la vida, ellos que me dieron la base para poder llegar a ser quien soy ahora.

A mis tíos (Victor y Benedicta), por darme un lugar dentro de su familia, por los buenos consejos en lo profesional y emocional.

A Electrosur S.A., por la información proporcionada, que sin ella la elaboración de esta tesis hubiera sido más difícil.

Gracian Wilber Pilco Acho



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por su bendición, siempre me guía por los caminos correctos de cada paso que doy en la vida.

A la Universidad Nacional Del Altiplano, principalmente a la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por forjarme y darme la oportunidad de ser un gran profesional.

Al Director de Tesis, Jurados y Docentes, que dedicaron una parte de su valioso tiempo para guiarme, enseñarme los valores y transmitirme todos sus conocimientos en el proceso de mi formación profesional.

Nicol Ningerson Molina Coaquira



AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque puedo tener un nuevo día para vivir en este mundo maravilloso, por no dejarme caer, por darme fuerzas para continuar con mi propósito.

A la empresa Regional de Servicio Público de Electricidad - Electrosur S.A., por la accesibilidad e información brindada para el desarrollo de la presente tesis.

A la Universidad Nacional Del Altiplano - Puno, principalmente a la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por haberme permitido formarme en sus aulas, gracias por formarme como profesional listo para enfrentar a nuevos retos.

Gracian Wilber Pilco Acho



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 19

ABSTRACT..... 20

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 21

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 22

1.2.1 Problema general..... 22

1.2.2 Problemas específicos 22

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN..... 22

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 23

1.4.1 Objetivo general 23

1.4.2 Objetivos específicos 23

1.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 23

1.5.1 Hipótesis general 23



1.5.2 Hipótesis específicas 23

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... 24

2.1.1 Antecedentes nacionales 24

2.1.2 Antecedentes internacionales 27

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN ESTUDIO..... 33

2.2.1 Identificación topológica..... 33

2.2.2 Subestación de transformación Yarada 33

2.2.3 Alimentador O-161 (terna P) 34

2.2.4 Alimentador O-162 (terna S) 35

2.2.5 Alimentador O-163 (terna N1)..... 35

2.2.6 Alimentador O-164 (terna N4)..... 35

2.2.7 Alimentador O-165 (terna Q)..... 36

2.3 SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN 36

2.3.1 Topología de sistemas de distribución 37

2.3.2 Aspectos de diseño y construcción 39

2.4 CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN..... 51

2.4.1 Suficiencia..... 52

2.4.2 Seguridad..... 53

2.4.3 Calidad 53

2.5 ENFOQUES PARA LA EVALUACIÓN DE CONFIABILIDAD 53



2.5.1 Enfoque probabilístico	53
2.5.2 Enfoque determinístico	54
2.6 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD	54
2.6.1 Método analítico.....	54
2.6.2 Método de enumeración de estados	56
2.6.3 Método con diagrama de bloques	57
2.7 ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	60
2.7.1 Reducir la frecuencia de interrupción	60
2.7.2 Reducir el tiempo de interrupción	61
2.7.3 Reducir el impacto de interrupción	62
2.8 PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD.....	63
2.8.1 Tasa de falla	63
2.8.2 Tiempo de reparación.....	65
2.8.3 Indisponibilidad.....	67
2.9 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD	67
2.9.1 Índice de confiabilidad SAIFI	69
2.9.2 Índice de confiabilidad SAIDI	69
2.10 CÁLCULO DE LA CONFIABILIDAD.....	69
2.10.1 Cálculo de confiabilidad mediante un registro de interrupciones	70
2.10.2 Cálculo de confiabilidad manualmente	72
2.10.3 Cálculo de confiabilidad con el software DigSilent Power Factory	74



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	89
3.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN	89
3.3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	89
3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN	90
3.4.1 Población y muestra	90
3.5 UBICACIÓN	90
3.6 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS	91
3.7 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	92
3.8 ÁMBITO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN.....	92
3.9 DISEÑO METODOLÓGICO.....	93
3.9.1 Información necesaria para evaluar la confiabilidad.....	94
3.9.2 Determinación de cálculos de los parámetros de confiabilidad mediante un registro de interrupciones	95
3.9.3 Determinación de los índices de confiabilidad	98
3.9.4 Determinación de la ubicación óptima de equipos de protección	99

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DIAGNÓSTICO DE LA CONFIABILIDAD.....	102
4.1.1 Índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada del periodo 2016 al 2019.....	102



4.1.2 Índices de confiabilidad mediante el registro de interrupciones - 2019..	103
4.2 PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD.....	106
4.3 INDICES DE CONFIABILIDAD MEDIANTE EL SOFTWARE DIGSILENT POWER FACTORY	107
4.4 UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN.....	108
4.5 DESEMPEÑO DE LA NUEVA PROPUESTA CON LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN.....	122
4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	125
V. CONCLUSIONES.....	126
VI. RECOMENDACIONES	127
VII. REFERENCIAS	128
ANEXOS.....	136

ÁREA : Eléctrica

TEMA: Sistemas de Potencia Eléctrica y Confiabilidad

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 10 de marzo de 2021



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Subestación de Transformación Yarada	34
Figura 2: Sistema de distribución radial	38
Figura 3: Sistema de distribución en anillo	39
Figura 4: Sistema eléctrico de distribución	40
Figura 5: Alimentador en media tensión	41
Figura 6: Sistema de distribución secundaria	44
Figura 7: Recloser RIVE	45
Figura 8: Recloser (NR002), instalado en la estructura O163-389	46
Figura 9: Seccionalizador automático START.....	47
Figura 10: Seccionalizador (SSA01), instalado en la estructura O162-827	48
Figura 11: Seccionador tipo CUT-OUT (O165-287)	49
Figura 12: Seccionador monopolar tipo cuchilla.....	50
Figura 13: Seccionador tipo cuchilla, instalado en la estructura O164-1020.....	51
Figura 14: Atributos del sistema eléctrico relacionados a la confiabilidad.....	52
Figura 15: Modelo de Markov para un componente con dos estados	55
Figura 16: Número de estados posibles para una cierta cantidad de componentes	56
Figura 17: Conexión en serie.....	57
Figura 18: Conexión en paralelo	59
Figura 19: Alternativas para reducir la frecuencia de interrupción	61
Figura 20: Alternativas para reducir la duración de la interrupción.....	62
Figura 21: Alternativas para reducir el impacto de la interrupción	63
Figura 22: Red de media tensión simple	65
Figura 23: Eventos de una interrupción imprevista.....	66
Figura 24: Índices de confiabilidad del sistema eléctrico	67



Figura 25: Parámetros para el cálculo de la confiabilidad y sus resultados	68
Figura 26: Configuración radial Simple	70
Figura 27: Ejemplo de reporte de interrupciones	71
Figura 28: Diagrama de flujo del procedimiento con DigSilent Power Factory	74
Figura 29: Configuración radial simple en DigSilent Power Factory	75
Figura 30: Modelo de falla para el tramo de Línea T(2km)	76
Figura 31: Modelo de falla para el tramo de Línea T(3km)	76
Figura 32: Modelo de falla para el tramo de Línea T(1km)	77
Figura 33: Modelo de falla para el tramo de Línea L(A)	77
Figura 34: Modelo de falla para el tramo de Línea L(B)	78
Figura 35: Modelo de falla para el tramo de Línea L(C)	78
Figura 36: Ubicación de equipos de protección en la red radial simple.....	79
Figura 37: Cálculo de parámetros de confiabilidad en cada carga con DigSilent Power Factory.....	79
Figura 38: Cálculo de los índices de confiabilidad con DigSilent Power Factory	80
Figura 39: Contingencias de la red radial simple	81
Figura 40: Análisis de contingencia para la “Línea T(3km)”.....	82
Figura 41: Simulación de falla en un tramo troncal de la red radial simple.....	83
Figura 42: Simulación de falla en un tramo lateral de la red radial simple.....	83
Figura 43: Configuración radial simple sin equipos de protección	84
Figura 44: Configuración radial simple – ubicaciones disponibles.....	85
Figura 45: Configuración radial simple – primera ubicación óptima.....	86
Figura 46: Configuración radial simple – con ubicación óptima	87
Figura 47: Zona de concesión Electrosur S.A.	93
Figura 48: Diagrama general para el estudio de Confiabilidad	94



Figura 49: Sectorización de redes de distribución.....	96
Figura 50: Modelo de falla para punto de seccionamiento O-161	99
Figura 51: Lenguaje de programación DPL para la ubicación óptima de equipos de protección.	100
Figura 52: Algoritmo para la ubicación óptima de equipos de protección.....	101
Figura 53: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada 2016-2019	103
Figura 54: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada 2019	104
Figura 55: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada 2019 sin fuerza mayor.....	105
Figura 56: Resultados de los índices SIFI y SAIDI calculados mediante el Software DigSilent Power Factory – Inicial	107
Figura 57: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-161	110
Figura 58: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-162.....	110
Figura 59: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-163	111
Figura 60: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-164.....	111
Figura 61: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-165	112
Figura 62: Gráfica de desempeño - Alimentador O-161.....	113
Figura 63: Gráfica de desempeño - Alimentador O-162.....	114
Figura 64: Gráfica de desempeño - Alimentador O-163.....	115
Figura 65: Gráfica de desempeño - Alimentador O-164.....	116
Figura 66: Gráfica de desempeño - Alimentador O-165.....	117
Figura 67: Barras de desempeño - Alimentador O-161.....	118
Figura 68: Barras de desempeño - Alimentador O-162.....	119
Figura 69: Barras de desempeño - Alimentador O-163.....	119
Figura 70: Barras de desempeño - Alimentador O-164.....	120
Figura 71: Barras de desempeño - Alimentador O-165.....	120



Figura 72: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada 2019 con ubicación óptima.	121
Figura 73: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada - inicial vs ubicación óptima.	123
Figura 74: Índices de confiabilidad inicial calculados mediante DigSilent Power Factory	124
Figura 75: Índices de confiabilidad calculados con la ubicación óptima mediante DigSilent Power Factory	124



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cálculo de confiabilidad mediante un registro de interrupciones	71
Tabla 2: Procedimiento de cálculo manualmente	72
Tabla 3: Cálculo de parámetros de confiabilidad por cada punto de carga	73
Tabla 4: Comparación de SAIFI y SAIDI con los tres métodos de cálculo.....	81
Tabla 5: Resumen del cálculo de confiabilidad por cada ubicación disponible	86
Tabla 6: Demanda máxima y cantidad de usuarios.	90
Tabla 7: Ubicación y descripción	90
Tabla 8: Técnicas e instrumentos para recolección de datos	91
Tabla 9: Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	92
Tabla 10: Resumen de cálculo de parámetros de confiabilidad	97
Tabla 11: Resultados de los indicadores SAIFI y SAIDI por año	102
Tabla 12: Resultados de los indicadores SAIFI y SAIDI por alimentador.....	103
Tabla 13: Resultados de los indicadores SAIFI y SAIDI sin fuerza mayor	105
Tabla 14: Resultados del cálculo de los parámetros de confiabilidad	106
Tabla 15: Resultados de los índices SAIFI y SAIDI inicial – reporte de interrupciones vs Software DigSilent Power Factory	108
Tabla 16: Resultado de las ubicaciones óptimas de los equipos de protección por alimentador.	108
Tabla 17: Resultados de los índices SAIFI y SAIDI por alimentador con ubicación óptima	121
Tabla 18: Resultados de los índices SAIFI y SAIDI - inicial vs con ubicación óptima.	122



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ACRÓNIMO :	SIGNIFICADO
SAIDI :	<i>Índice de Duración de Interrupción Promedio del Sistema.</i>
SAIFI :	<i>Índice de Frecuencia de Interrupciones Promedio del Sistema.</i>
DEC :	<i>Duración Equivalente por Consumidor.</i>
FEC :	<i>Frecuencia Equivalente por Consumidor.</i>
S.A. :	<i>Sociedad Anónima.</i>
DPL :	<i>Lenguaje de Programación en DigSilent PowerFactory.</i>
DPF :	<i>Software de Simulación DigSilent PowerFactory.</i>
SE :	<i>Subestación Eléctrica.</i>
SMC :	<i>Simulación Montecarlo.</i>
MT :	<i>Media Tensión.</i>
BT :	<i>Baja Tensión.</i>
kV :	<i>Kilovoltio.</i>
kVA :	<i>Kilovoltiamperio.</i>
etc. :	<i>Etcétera.</i>
A :	<i>Amperio.</i>
λ :	<i>Tasa de falla.</i>
μ :	<i>Tasa de reparación.</i>
CAIDI :	<i>Índice de duración de interrupción promedio por cliente interrumpido.</i>
CAIFI :	<i>Índice de Frecuencia de Interrupción Promedio del Cliente.</i>



ASAI	:	<i>Índice de disponibilidad promedio del servicio.</i>
ASIFI	:	<i>Índice de frecuencia de interrupciones promedio del sistema por kVA conectado.</i>
ASIDI	:	<i>Índice de duración de interrupciones promedio del sistema por kVA conectado.</i>
km	:	<i>Kilómetro.</i>
r	:	<i>Tiempo de reparación.</i>
MVA	:	<i>Megavoltiamperio.</i>
YNd5	:	<i>Grupo de Conexión del transformador.</i>
h	:	<i>Horas.</i>
ALM	:	<i>Alimentador en media tensión.</i>
GFE	:	<i>Portal Integrado del Sistema de Información Técnica – Osinergmin.</i>
GIS	:	<i>Sistema de Información Geográfica.</i>



INSTITUCIONES

- ELS : *Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad –
Electrosur S.A.*
- OSINERGMIN: *Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.*
- IEEE : *Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.*



RESUMEN

Actualmente la sociedad es más exigente con la continuidad del suministro eléctrico o también llamado confiabilidad del sistema eléctrico de distribución, de la cual se encargan las empresas concesionarias de distribución de energía eléctrica, esto hace necesario que cada vez se deba implementar equipos más eficientes, una mejor ubicación de equipos de protección, con la finalidad de mejorar los índices de confiabilidad. El presente trabajo de investigación tiene por objetivo implementar una propuesta de optimización para mejorar los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada. Para llevar a cabo el diagnóstico de la confiabilidad, se realizó el cálculo de los parámetros de confiabilidad para las líneas en base a la información del reporte de interrupciones de Electrosur S.A. en el periodo (enero - diciembre 2019). Mediante el Software DigSilent Power Factory se realizó el modelamiento de la red con los equipos de protección existentes, dando como resultado el cálculo de los índices de confiabilidad SAIFI 28.568 y SAIDI 62.558, estos valores actualmente superan las tolerancias exigidos por parte de Osinergmin SAIFI 7.0 Y SAIDI 12.0, por lo que está sujeto a multas y sanciones. Debido a ello con la nueva propuesta de optimización, se reubicó los equipos de protección existentes a una ubicación óptima, mejorando así los índices de confiabilidad SAIFI 15.784 que representa el 44.7% y SAIDI 36.816 que representa el 41.1% respecto al caso inicial. En conclusión, ubicando óptimamente los equipos de protección permiten mejorar significativamente los índices de confiabilidad. El presente trabajo de investigación es del tipo aplicada, porque a partir del diagnóstico actual del sistema eléctrico se pretende resolver el problema de la confiabilidad del sistema eléctrico Yarada.

Palabras Clave: Alimentador, Confiabilidad, Continuidad, Equipos de Protección, Sistema Eléctrico.



ABSTRACT

Currently, society is more demanding with the continuity of the electricity supply or also called the reliability of the electrical distribution system, which is in charge of the concessionary companies of electrical energy distribution, this makes it necessary to implement more efficient equipment, better location of protective equipment, in order to improve reliability indexes. The objective of this research work is to implement an optimization proposal to improve the reliability indexes of the Yarada electrical system. To carry out the reliability diagnosis, the reliability parameters for the lines were calculated based on the information from the ElectroSur S.A. outage report. in the period (January - December 2019). Using the DigSilent Power Factory Software, the network was modeled with the existing protection equipment, resulting in the calculation of the reliability indices SAIFI 28.568 and SAIDI 62.558, these values currently exceed the tolerances required by Osinergmin SAIFI 7.0 Y SAIDI 12.0, for which it is subject to fines and penalties. Due to this, with the new optimization proposal, the existing protection equipment was relocated to an optimal location, thus improving the reliability indices SAIFI 15,784 which represents 44.7% and SAIDI 36,816 which represents 41.1% compared to the initial case. In conclusion, optimally locating the protective equipment allows to significantly improve the reliability indexes. The present research work is of the applied type, because from the current diagnosis of the electrical system it is intended to solve the problem of the reliability of the Yarada electrical system.

Keywords: Feeder, Reliability, Continuity, Protective Equipment, Electrical System.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En nuestro país la calidad de servicio de energía eléctrica cada vez está tomando mayor importancia, debido a las condiciones exigibles en aplicación de la normativa vigente, que exige que el suministro eléctrico debe ser de forma continua, segura y con calidad por parte de las empresas concesionarias de energía eléctrica.

La creciente demanda de energía eléctrica, la antigüedad de las instalaciones eléctricas y la expansión de redes de distribución son factores que involucran la confiabilidad del sistema eléctrico Yarada. Las interrupciones de suministro eléctrico no pueden prevenirse del todo y éste tiene un impacto directo sobre la satisfacción de los clientes, por lo tanto, es un gran reto mantener una red eléctrica con un grado alto de confiabilidad.

Esta tesis está orientada al problema de la continuidad de suministro eléctrico, que forma parte del concepto más general denominado confiabilidad de servicio eléctrico. Basándonos en la cantidad de interrupciones (185 interrupciones) suscitados en el periodo anual de enero – diciembre del año 2019 del sistema eléctrico Yarada, donde se observa que los índices de confiabilidad SAIFI 28.568 y SAIDI 62.558, actualmente superan las tolerancias exigidos por parte de Osinergmin SAIFI 7.0 y SAIDI 12.0, por lo que está sujeto a multas y sanciones.

Muchos profesionales de la materia optan por instalar los equipos de protección a inicios de un ramal radial sin considerar si es la ubicación óptima. Colocar los equipos de protección en ubicaciones óptimas es considerado una decisión difícil pero vital en lo referente a la planificación de la distribución, por tal motivo se pretende encontrar las



ubicaciones adecuadas para los equipos de protección del sistema eléctrico Yarada para mejorar los índices de confiabilidad como SAIFI y SAIDI.

Si esta situación permaneciera, el sistema eléctrico Yarada pasaría a ser un sistema eléctrico crítico con muchos cortes de suministro eléctrico, el cual repercute en pérdidas económicas de energía eléctrica dejada de vender, mala reputación por parte de los usuarios y sanciones por parte de Osinergmin.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

¿Con la nueva propuesta de optimización se mejorará los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, Tacna?

1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿Cómo determinar los parámetros de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, en base al reporte histórico de interrupciones?
- b) ¿Cómo ubicar óptimamente los equipos de protección del sistema eléctrico Yarada?

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

La predicción de índices de confiabilidad pretende determinar el comportamiento que tendrá la red, basado en el desempeño pasado, y ayudar en la toma de decisiones sobre la óptima ubicación de equipos de protección en los alimentadores del sistema eléctrico Yarada.

Actualmente, se tiene que los indicadores como son el SAIFI y SAIDI han superado los valores permitidos que se tenía como meta para el año 2019. Además, se espera que este seguirá aumentado para los siguientes años.

Las interrupciones de energía eléctrica en el periodo anual 2019 ascienden a 185 interrupciones según el reporte de Electrosur S.A., en el caso de no dar solución a estas



deficiencias, la empresa concesionaria continuará teniendo una mala imagen, sufriendo grandes pérdidas económicas, multas por parte de Osinergmin (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería) y los usuarios seguirán recibiendo un defectuoso servicio eléctrico.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Simular y evaluar la nueva propuesta de optimización de los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, Tacna.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Determinar los parámetros de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, en base al reporte histórico de interrupciones.
- b) Desarrollar un algoritmo en DPL sobre la ubicación óptima para los equipos de protección del sistema eléctrico Yarada.

1.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Hipótesis general

Con la implementación de la nueva propuesta de optimización se mejora significativamente los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, Tacna.

1.5.2 Hipótesis específicas

- a) Teniendo el reporte histórico de interrupciones, satisface los requerimientos del módulo de confiabilidad del software utilizado para determinar los parámetros de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada.
- b) Mediante el algoritmo en DPL aplicado al sistema eléctrico Yarada optimiza la cantidad y el lugar adecuado de los equipos de protección.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Antecedentes nacionales

En el artículo elaborado por *Sayas (2013)* con el título denominado “Ubicación óptima de equipos de seccionamiento, protección e impacto de la instalación de indicadores de fallas en los índices de confiabilidad”. Los investigadores desarrollaron la técnica de enumeración de estados del software DIGSILENT PowerFactory para realizar los cálculos de los índices de confiabilidad y también desarrollaron un algoritmo para la ubicación óptima de seccionadores y equipos de protección, mediante dicha investigación llegaron a la conclusión que, ubicando adecuadamente los equipos de seccionamiento, protección e instalando convenientemente los indicadores de falla, es posible mejorar significativamente los índices de confiabilidad (SAIDI y SAIFI), además recomiendan que, para el mejoramiento de los índices de confiabilidad es necesario el llevar acabo otras estrategias como el mantenimiento y reforzamiento de las líneas de distribución, limpieza de franja de servidumbre, entre otras, con el fin de reducir las tasas de fallas y los tiempo de reparación.

El reciente proyecto final de tesis para la obtención del título profesional de Ingeniero Electricista, elaborado por *Simeon (2019)* con el título denominado “Ubicación óptima del seccionador fusible para mejorar los indicadores SAIDI y SAIFI en el sistema eléctrico rural de Ayacucho”. De forma similar desarrollaron la investigación donde, el problema principal es: ¿Cómo ubicar óptimamente los seccionadores fusibles para mejorar los indicadores SAIDI y SAIFI del sistema eléctrico rural de Ayacucho? De igual modo el tipo de investigación que utilizaron fue la de tipo aplicada porque dicha investigación puede ser implementada en campo para dar solución al problema de



confiabilidad, adicionalmente desarrollaron la cantidad óptima de equipos de protección para mejorar los índices de confiabilidad como SAIDI y SAIFI del sistema, utilizando el software de simulación de sistemas eléctricos de potencia DIgSILENT PowerFactory y su lenguaje de programación DPL. Dando como resultados que, al realizar una ubicación adecuada de los equipos de protección permiten mejorar significativamente los indicadores de confiabilidad de los sistemas eléctricos.

El reciente proyecto final de graduación para la obtención del título profesional de Ingeniero Electricista, elaborado por *Quispe (2019)* con el título denominado “Mejoramiento de la confiabilidad mediante la reubicación de seccionadores en el alimentador a4803 de la subestación Chanchamayo”. De forma similar que esta investigación, el propósito de dicha tesis era mejorar la confiabilidad mediante la reubicación de seccionadores en el alimentador A4803 de la subestación Chanchamayo, donde el desarrollo para cuantificar la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución se basó en los índices de confiabilidad descritos en la Norma IEEE ([1366-2003]), utilizando el análisis de modo de fallas lograron reubicar los seccionadores donde claramente logran mejorar la confiabilidad en el sistema eléctrico, también simularon en el software DIgSILENT PowerFactory donde obtuvieron resultados favorables del SAIDI y SAIFI logrando así mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico, concluyendo que las ubicaciones anteriores de los seccionadores del alimentador A4803 no eran los adecuados, razón por la cual los índices de confiabilidad SAIDI y SAIFI eran elevados.

El proyecto final de tesis para la obtención del título profesional de Ingeniero Electricista desarrollados por los bachilleres *Baca & Loyaga (2016)* con el título denominado “Estudio de mejoramiento de la confiabilidad del alimentador en media tensión Tintaya 01, en la provincia de Espinar.” Los autores de esta tesis de forma similar también realizaron el análisis de confiabilidad, pero del alimentador de Tintaya TI-01 de



la empresa de distribución Electro Sur Este S.A. donde realizaron un estudio histórico y estudio predictivo. El estudio histórico corresponde al cálculo de las tasas de fallas y tiempos de reparación de los equipos del sistema de distribución, a partir de la información de fallas e interrupciones registradas en Electro Sur Este durante el periodo 2011-2014. El estudio predictivo, por otro lado, consistió en determinar los índices del sistema, tales como SAIDI (índice de duración de interrupciones promedio del sistema), SAIFI (índice de frecuencia de interrupciones promedio del sistema), DEC (duración equivalente por consumidor) y FEC (frecuencia equivalente por consumidor). Realizan un análisis de los resultados del estudio histórico, y da una alternativa de mejora de la confiabilidad, el cual consiste en el incremento del número de dispositivos de protección para el alimentador seleccionado en estudio. Finalmente llegan a la conclusión que incrementando el número de equipos de protección mejoran el suministro eléctrico por tanto también los índices de confiabilidad.

En el proyecto final de tesis para la obtención del título profesional de Ingeniero Electricista desarrollado por el bachiller *Quispe (2019)* con el título denominado “Reducción de las interrupciones eléctricas por ubicación adecuada de reconectores automáticos en el sistema eléctrico rural en 22.9 kV – Satipo.” En el trabajo de investigación se desarrolla el tema sobre la calidad de la energía recibida a los usuarios finales, según las exigencias de las normas peruanas. En el estudio de la tesis se desarrolló el problema de calidad eléctrica, más exacto, sobre las interrupciones del servicio a los consumidores finales en las redes primarias, para lo cual se sigue un procedimiento para ubicar adecuadamente los equipos para la protección, llamados: Reconectores Automáticos, con lo cual mejorar la confiabilidad de las redes, además se tiene en cuenta de encontrar la ubicación más adecuada al menor costo. Para ello utilizaron un algoritmo que hicieron en el software DIgSILENT Power Factory (DPL) en su lenguaje de



programación, con este se ubica adecuadamente los equipos para la protección, finalmente concluyen que reubicando los reclosers se obtuvo la reducción de las interrupciones eléctricas y la mejora de los índices de confiabilidad.

El proyecto final de tesis para optar el grado académico de doctor en Ingeniería Eléctrica desarrollado por *Cueva (2019)* con el título denominado “Evaluación de índices de confiabilidad en redes de Electrocentro s.a. para mejorar la calidad de servicio utilizando redes neuronales.” De forma similar en el ámbito de concesión de la Empresa Electrocentro S.A., la problemática de las interrupciones por diversos motivos, se producen con mayor frecuencia en la zona rural, normalmente causados por tormentas eléctricas, huaycos que arrasan con las líneas de distribución, vandalismo, cortocircuitos, las cuales repercuten en el sistema por la extensión de las mismas y la topología de las redes que normalmente son del tipo radial, lo cual influye directamente en los tiempos de reparación, todo esto ligado a la escasa inversión que se realiza en estas zonas donde el índice de morosidad es muy alto, considerando que las electrificaciones fueron realizadas a manera de apoyo social. En el presente trabajo se evaluó los índices de confiabilidad SAIDI y SAIFI en los alimentadores A4701 y A4702 de la S.E. Ninatambo, se realizaron simulaciones bajo dos escenarios, uno favorable y uno conservador, utilizando la herramienta computacional DIGSILENT Power Factory, contando con una data correspondiente al año 2016 y 2017, los resultados que obtuvieron contemplan la disminución de la frecuencia y el tiempo de las interrupciones para los alimentadores mencionados, considerando la reubicación e inclusión de equipos de protección en el recorrido de las líneas.

2.1.2 Antecedentes internacionales

En la tesis de profundización para optar al título de magister en Ingeniería Eléctrica desarrollado por *Vargas (2015)* con el título denominado “Estudio de



indicadores de calidad del suministro de energía eléctrica de una red de distribución a 13.2kV”. En este trabajo presentan, en primer lugar, definiciones y normas internacionales relacionadas con indicadores de calidad del suministro identificados en la resolución 098 de 2008. Luego se identifica los circuitos con peores índices de calidad del suministro. En segunda instancia, se identifica los circuitos de la red de distribución, del operador del servicio de energía eléctrica, con peores índices de calidad del suministro con el fin de identificar la magnitud del problema. Finalmente, se exponen conceptos relacionados con aplicaciones de automatización como la principal solución para disminuir la ocurrencia y duración de desconexiones fortuitas la calidad y de esta manera aumentar la confiabilidad del sistema eléctrico.

En la tesis de grado previo a la obtención del título de magister en Ingeniería Eléctrica en Distribución desarrollado por *Albuja (2019)* con el título denominado “Cálculo de índices de confiabilidad utilizando simulación Montecarlo y ubicación de equipos de protección en sistemas eléctricos de distribución mediante algoritmos genético”. En dicha investigación el autor desarrolla una metodología para la aplicación de la Simulación Montecarlo (SMC) en el cálculo de índices de confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución de tipo radial, utilizando el enfoque de duración de estados y el método de la transformada inversa para encontrar los tiempos de operación y falla de los elementos, en esta metodología se han utilizado las técnicas de redes neuronales artificiales (ANN) y máquina de soporte vectorial (SVM) para reducir los tiempos computaciones, principal desventaja del método de SMC. La metodología de SMC para el cálculo de índices de confiabilidad es implementada como parte de la función de evaluación de un algoritmo genético, desarrollado para determinar la ubicación de equipos de protección (seccionadores barra, seccionadores fusible y reconectores automáticos), con el objetivo de mejorar los índices de confiabilidad y optimizar las



inversiones, en base a una función de beneficio económico. Esta metodología ha sido implementada en un programa computacional desarrollado en Matlab y fue aplicada en un sistema de prueba de cuatro cargas, el sistema IEEE RBTS Bus 2 y el Alimentador 27F de la Empresa Eléctrica Quito. Los resultados obtenidos permitieron analizar los distintos esquemas de protección y verificar los cambios que se requieren al variar las condiciones de la red como son el costo de la energía no suministrada, costos de instalación y tipos de fallas (momentáneas o permanentes).

En la tesis de grado previo a la obtención del título de magíster en Ingeniería Eléctrica en Distribución desarrollado por *Morales (2018)* con el título denominado “Selección y ubicación óptima de dispositivos de seccionamiento y protección en alimentadores primarios como una estrategia para el mejoramiento de la confiabilidad de los sistemas eléctricos de distribución”. En el presente trabajo desarrollan una metodología para la selección y ubicación óptima de dispositivos de seccionamiento y protección en alimentadores primarios de los sistemas eléctricos de distribución, como parte de estrategias de mejoramiento de la confiabilidad de estos sistemas eléctricos. La propuesta metodológica comprende en una primera etapa la determinación de los aspectos relacionados con características de la red, parámetros de fallas, requerimientos operativos y reglamentación de la calidad del servicio vinculada; en una segunda etapa se define un modelo de confiabilidad que comprende el método de evaluación, selección de índices, metas y estrategias de mejoramiento a través del empleo de diferentes tipos de dispositivos de maniobra y protección y esquemas para su asignación. Como una tercera etapa se estructuró la asignación de estos dispositivos en un problema de optimización matemática de tipo combinatorial, el modelamiento y codificación del sistema, la función de evaluación y las restricciones para la selección de candidatos factibles. La codificación e implementación de la metodología como una cuarta etapa se lleva a cabo mediante un



programa computacional de tipo académico desarrollado en lenguaje en entorno Python. Finalmente, como una quinta etapa se lleva adelante la validación de la metodología aplicándola a una red de prueba IEEE, para lo cual se emplean valores de publicaciones indexadas tanto para los parámetros de entrada de confiabilidad como para la comparación de los resultados obtenidos, así como también se aplica a una red de un alimentador real con el propósito de comprobar tanto su funcionalidad como los beneficios de la misma. Donde obtuvieron como resultado que la metodología propuesta ha impactado en los índices de confiabilidad de manera positiva el cual se obtiene con la asignación óptima de los dispositivos de protección.

El proyecto final de tesis para optar el título de Ingeniero de Ejecución en Electricidad desarrollado por *Contreras & Jara (2017)* con el título denominado “Actualidad en índices de confiabilidad de sistema y cliente, a nivel nacional e internacional en el área de sistemas eléctricos de distribución”. Los autores desarrollan tópicos relacionados con la calidad del suministro eléctrico, brindado por las empresas de distribución y se dan a conocer los principales elementos que producen perturbaciones en la señal sinusoidal de la red, la cantidad máxima de interrupciones establecidas por la ley y cuáles son los principales organismos reguladores que velan por el cumplimiento de las exigencias establecidas. Donde abordan el tema de índices de confiabilidad, usados en ciudades de Estados Unidos, una breve descripción de su red de distribución y cuáles son los organismos reguladores para así tener una referencia, en cuanto a la realidad internacional, logrando con esto una comparación con la realidad chilena. En lo que respecta a la teoría de confiabilidad aplicada en sistemas eléctricos de distribución, describieron los conceptos que intervienen en los cálculos de confiabilidad, dando un análisis de donde provienen cada uno de ellos, donde muestran los diversos métodos para la modelación de los sistemas de distribución. Con el objetivo de entender de mejor



manera, los cálculos implicados en los índices de confiabilidad, también optaron por analizar una pequeña red de Distribución (red de prueba), siendo posible realizar un procedimiento muy detallado de la obtención de todos los parámetros y por lo consiguiente un análisis de todos los resultados obtenidos. Gracias a la colaboración de CGE Distribución, tuvieron acceso a la información de un alimentador de su propiedad, específicamente “Hualqui”. Los trazados de las líneas y componentes con las que cuentan en este sector, son visualizados por un software denominado “QGIS” que es un Sistema de Información Geográfica. Para el modelado y análisis de dicha red, optaron por usar el software “DIgSILENT”, el cual dentro de la gama inmensa de funciones que presta, cuenta con análisis de confiabilidad en redes de distribución eléctrica. En síntesis, un análisis detallado de los índices de confiabilidad, podrá ayudar a una empresa de distribución a la toma de decisiones, evaluando el comportamiento de sus redes, viendo puntos débiles, para así crear planes de contingencia ante fallas en sus líneas o bien, invertir en nuevas tecnologías, todo esto con el fin de brindar un mejor servicio continuo y de calidad a los usuarios.

En el reciente proyecto final para la obtención del título profesional de Ingeniero Eléctrico desarrollado por *Ayala (2018)* con el título denominado “Optimización del sistema de seccionamiento en redes de distribución usando algoritmo de colonia de hormigas”. El autor muestra un nuevo y eficiente método para resolver el problema de la localización óptima de seccionadores en sistemas de distribución de energía para la mejora del indicador SAIDI, asociados a la frecuencia; con la que inciden las fallas transitorias y permanentes de la red eléctrica de distribución. Se propone una técnica de óptima ubicación de dispositivos seccionadores, en el cual se considera la planificación y diseño de las subestaciones; desde una perspectiva técnica económica utilizando un enfoque de resolución metaheurística de colonia de hormigas para un sistema de



distribución radial. El modelo está enfocado a minimizar el índice SAIDI. Como estrategia de solución se propone una metodología que considera un esquema de búsqueda, basado en el comportamiento de las hormigas. Con el fin de verificar la validez del algoritmo se utiliza un software especializado y se aplica los resultados a datos reales de la IEEE para 30 nodos. Podemos concluir que la investigación contribuye notablemente en el aumento de la confiabilidad del sistema eléctrico, obtenida a partir de la implementación de dispositivos seccionadores y mejorando los indicadores de este caso; puesto que el indicador SAIDI, al ser usado permitió una mejor visión de la realidad de las redes eléctricas y de la gran importancia de optimizar la red eléctrica de distribución.

Por último, en el reciente proyecto final para la obtención del título profesional de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico desarrollado por *Tapia (2019)* con el título denominado “Estudio de confiabilidad en los alimentadores de la subestación Cayambe”. En dicho estudio el autor realiza una evaluación de confiabilidad en los 5 alimentadores primarios de la Subestación Cayambe con los datos comprendidos entre el 1 de marzo del 2017 al 28 de febrero del 2018 para mejorar la continuidad de servicio eléctrico. Para llevar a cabo esta tarea realizó dos estudios, siendo el primero el análisis Histórico de Confiabilidad el cual requiere datos de las causas que ocasionaron las interrupciones en las líneas de Media Tensión de 13,8 kV y en los transformadores de distribución con la acción de los elementos de protección existentes los cuales son visualizados en el programa ArcGis; y el segundo estudio mediante la implementación de Nueva Coordinación de Protecciones propuesta por la empresa eléctrica Emelnorte que se enfocó en el uso de fusibles tipo T para las líneas de Media Tensión y tipo Slow Fast para transformadores. Con herramienta informática Cymdist realizaron los cálculos de los dos estudios mencionados, el cual proporciona los valores de índices confiabilidad tales como



TTIK, FMIK, SAIDI, CAIDI, LEI, CEMI, CELID, ENS, AENS, ASAI y longitud de línea en cada uno de los estudios. Al obtener estos valores realizaron un posterior análisis para conocer los índices que pueden ser aceptables o perjudiciales, y finalmente llegaron a la conclusión que la implementación de Nueva Coordinación de Protecciones resulta ser favorable reduciendo el número de clientes afectados y el tiempo de desconexión, y los valores de los índices TTIK y FMIK resultantes están por debajo de los límites establecidos por la Regulación CONELEC 004-01.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN ESTUDIO

El sistema eléctrico de distribución Yarada se inicia con la bahía de llegada de la línea L-6659, ésta es la bahía de llegada general en 66kV.

Existe una celda para el Transformador de Potencia, esta celda está constituida por un (01) transformador de potencia con regulación automática de $(66\pm 10 \times 0.8\%) / 10.5\text{kV}$, 13 MVA y grupo de conexión Ynd5.

En la barra de 10kV se cuenta con cinco alimentadores para poder suministrar de energía al sistema eléctrico Yarada.

2.2.1 Identificación topológica

El Sistema Eléctrico Yarada, presenta una topología caracterizada por ser una red que, en toda su extensión, resulta radial.

2.2.2 Subestación de transformación Yarada

El sistema eléctrico Yarada cuenta con un Transformador de potencia con regulación automática de $(66\pm 10 \times 0.8\%) / 10.5\text{kV}$, 13 MVA y grupo de conexión Ynd5, suministra energía a los alimentadores en 10kV: O-161, O-162, O-163, O-164 y O-165, la barra 10kV se caracteriza por estar en delta y su aterramiento se realiza a través de un Transformador Zigzag con resistencia limitadora.

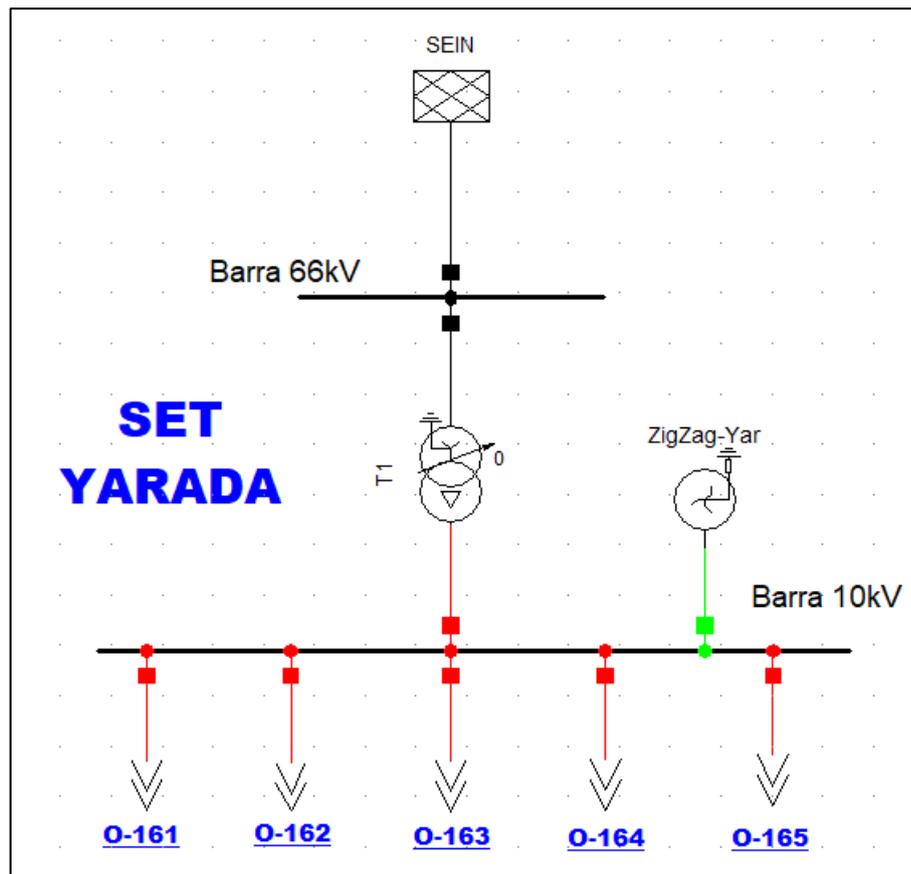


Figura 1: Subestación de Transformación Yarada

(Elaborado por el equipo de trabajo)

La red de Media Tensión es del tipo trifásico en la mayor parte de su extensión, también existe la presencia de algunas cargas bifásicas.

2.2.3 Alimentador O-161 (terna P)

La terna “P” se alimenta con normalidad a partir de la S.E. Yarada, la misma que a partir del interruptor O-161 alimenta con una tensión de 10kV, que distribuye de suministro eléctrico al Asentamiento 5 y 6 - Yarada.

Este alimentador cuenta para su protección con un (01) recloser multifunción marca RESEAD.

Aguas abajo, en el recorrido del alimentador se encuentra 10 seccionadores tipo CUT-OUT, 02 seccionalizadores automáticos marca RESEAD; además, cuenta con 47 subestaciones de distribución y recorre cerca de 10.94km



2.2.4 Alimentador O-162 (terna S)

La terna “S” se alimenta con normalidad a partir de la S.E. YARADA, la misma que a partir del interruptor O-162 alimenta con una tensión de 10kV, que distribuye de suministro eléctrico al C.P.M. Los Palos, Complejo Santa Rosa - Yarada.

Este alimentador cuenta para su protección con un (01) recloser multifunción marca RESEAD.

Aguas abajo, en el recorrido del alimentador se encuentra 03 reclosers marca RESEAD, 47 seccionadores tipo CUT-OUT, 02 seccionalizadores automáticos marca RESEAD, 01 regulador de tensión de 10.2kV; además, cuenta con 114 subestaciones de distribución y recorre cerca de 32.18km.

2.2.5 Alimentador O-163 (terna N1)

La terna “N1” se alimenta con normalidad a partir de la S.E. Yarada, la misma que a partir del interruptor O-163 alimenta con una tensión de 10kV, que distribuye de suministro eléctrico al C.P. Yarada Baja, Los Olivos, Rancho Grande - Yarada.

Este alimentador cuenta para su protección con un (01) recloser multifunción marca RESEAD.

Aguas abajo, en el recorrido del alimentador se encuentra 02 reclosers marca RESEAD, 21 seccionadores tipo CUT-OUT, 04 seccionalizadores automáticos marca RESEAD; además, cuenta con 101 subestaciones de distribución y recorre cerca de 19.74km.

2.2.6 Alimentador O-164 (terna N4)

La terna “N4” se alimenta con normalidad a partir de la S.E. Yarada, la misma que a partir del interruptor O-164 alimenta con una tensión de 10kV, que distribuye de suministro eléctrico al C.P. Yarada Baja, Los Olivos, Rancho Grande, Boca del Rio, Vila Vila - Yarada.



Este alimentador cuenta para su protección con un (01) recloser multifunción marca RESEAD.

Aguas abajo, en el recorrido del alimentador se encuentra 02 reclosers marca RESEAD que se ubican en los 2 lados del transformador elevador, 31 seccionadores tipo CUT-OUT, 01 transformador elevador de 10/22.9kV; además, cuenta con 73 subestaciones de distribución (10-22.9kV) y recorre cerca de 34.66km.

2.2.7 Alimentador O-165 (terna Q)

La terna “Q” se alimenta con normalidad a partir de la S.E. Yarada, la misma que a partir del interruptor O-165 alimenta con una tensión de 10kV, que distribuye de suministro eléctrico a la Cooperativa 28, Asentamiento 4, Copare - Yarada.

Este alimentador cuenta para su protección con un (01) recloser multifunción marca RESEAD.

Aguas abajo, en el recorrido del alimentador se encuentra 13 seccionadores tipo CUT-OUT; además, cuenta con 53 subestaciones de distribución y recorre cerca de 12.05km.

2.3 SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN

El sistema eléctrico de distribución es el conjunto de elementos encargados de transportar el suministro de energía eléctrica desde el sistema de transmisión hacia los usuarios finales del servicio eléctrico. En otras palabras, la energía eléctrica debe atravesar por las redes primarias de distribución, los transformadores de distribución, las redes secundarias, las acometidas, para finalmente llegar a los medidores de cada usuario. *(Dammert, Molinelli & Carbajal, 2011)*

La distribución de energía eléctrica debe garantizar que el usuario reciba un servicio de calidad y sin interrupciones, con un valor de voltaje adecuado que le permita



el normal funcionamiento de sus aparatos eléctricos y que la forma de onda senoidal sea pura, es decir que esté libre de armónicas. (*Yebra, 2009*)

Los sistemas de distribución en media tensión son quienes contribuyen en mayor proporción a la indisponibilidad del suministro de energía eléctrica con respecto a la generación y transmisión. (*Pareja & Pérez, 2017*)

2.3.1 Topología de sistemas de distribución

Según *Aquino (2018)* indica que la topología de los sistemas eléctricos de distribución es descrita por la conexión de los componentes del sistema, básicamente existen dos tipologías de un sistema de distribución.

- Radial.
- Anillo.

2.3.1.1 Sistema de distribución radial

Un sistema de distribución radial está compuesto de una sola entrada de alimentación y ésta es distribuida a todas las cargas que conforman la red de distribución. (*Ayre, 2005*)

Es la más sencilla de todas las topologías de distribución y por lo tanto la más económica, es usada extensivamente para alimentar zonas donde se tiene una densidad de carga baja o mediana. Recibe el nombre de radial ya que los alimentadores primarios salen de forma radial de la subestación de transformación hacia las subestaciones de distribución los cuales proveen suministro eléctrico a los usuarios mediante los alimentadores secundarios. Sin embargo, su continuidad se encuentra limitada a una sola fuente, ya que el servicio se verá interrumpido en cuanto falle alguno de sus elementos en serie (Líneas, fusibles, interruptores etc.). (*UNAM, 2015*)

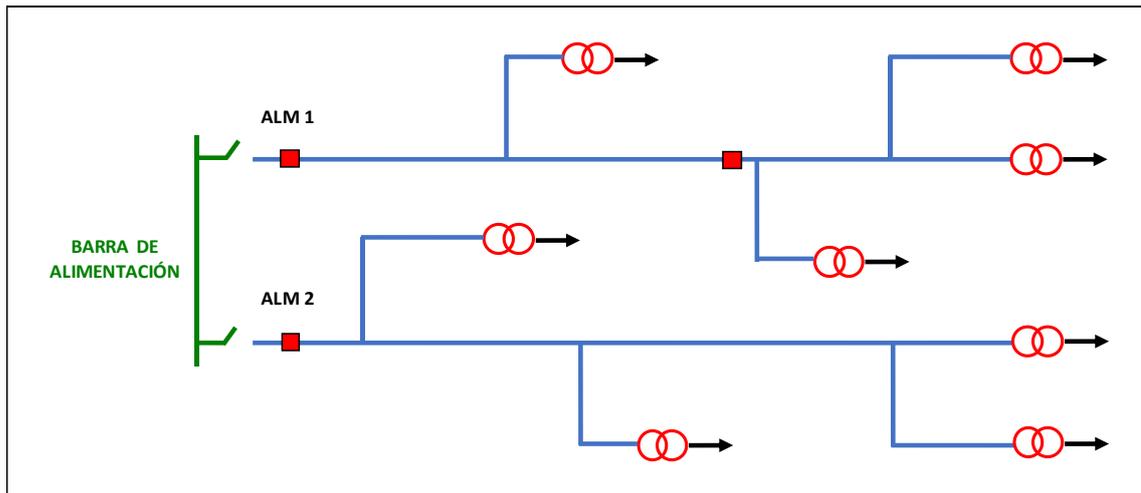


Figura 2: Sistema de distribución radial
(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.3.1.2 Sistema de distribución anillo

Esta configuración permite alimentar a las cargas que fueron afectas por una interrupción, gracias a otra fuente de alimentación y de un seccionador de línea que ayuda aislar la falla. (Ayre, 2005)

En esta topología normalmente la energía es suministrada continuamente mediante una o dos fuentes de alimentación, permitiendo que al momento de una falla en algún alimentador primario el servicio se restablezca rápidamente. Otra ventaja importante es que, al momento de una falla, se puede aislar el tramo afectado para repararlo sin dejar la continuidad del servicio en el resto del anillo como se muestra en la siguiente figura. (UNAM, 2015)

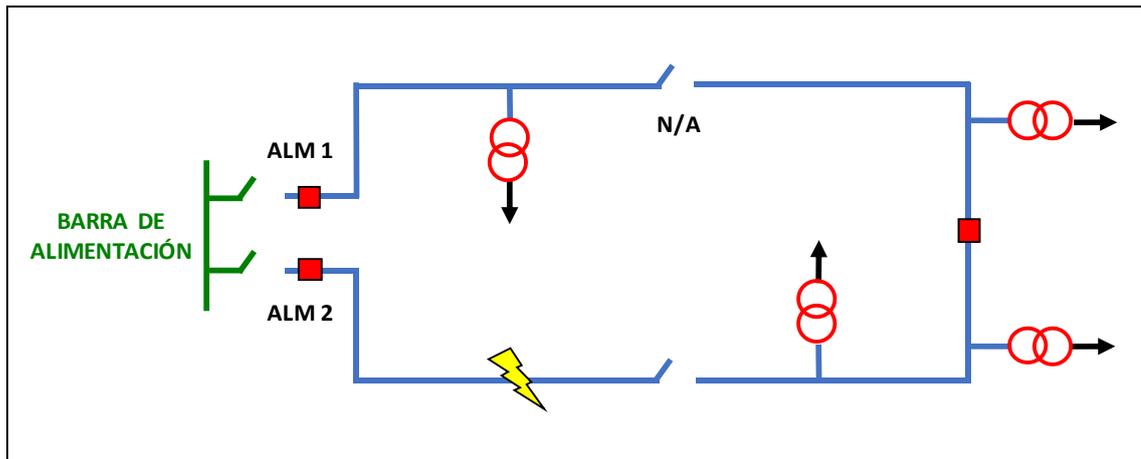


Figura 3: Sistema de distribución en anillo

(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.3.2 Aspectos de diseño y construcción

El sistema de distribución es un conjunto de instalaciones eléctricas asociados para el transporte y la transformación de energía eléctrica. El sistema de distribución de la energía eléctrica generalmente se divide en dos partes: Redes de media tensión y redes de baja tensión, los cuales se difieren de acuerdo a su nivel de tensión que utilizan para distribuir de forma adecuada y segura, con la capacidad necesaria para cubrir la demanda del suministro eléctrico de los clientes. (Duque, 2016)

De acuerdo a la *R.D. N° 018-2002-EM/DGE (2002)*, el sistema de distribución eléctrica comprende:

- Sistema de Distribución Primaria, son las redes y subestaciones cuyas tensiones de servicio son mayores de 1 kV y menores de 30 kV, denominado red primaria o media tensión.
- Sistema de Utilización en Media Tensión, es aquel que está conformado por el conjunto de instalaciones eléctricas de media tensión, comprendida desde el punto de entrega hasta los bornes de baja tensión del transformador, destinado

a suministrar energía eléctrica a las industrias, colegios, etc., denominados clientes mayores.

- Subsistema de Distribución Secundaria, son las redes de servicio público cuyas tensiones de servicio son iguales o menores a 1 kV, denominado red secundaria o baja tensión.
- Instalaciones de Alumbrado Público, son las redes y unidades de alumbrado destinadas al alumbrado público de las vías, plazas y parques.
- Conexión en Baja Tensión, conjunto de dispositivos e instalaciones efectuadas a tensiones hasta 1 kV, comprende: la acometida y sus accesorios de conexión, dispositivo de protección y el equipo de medición.

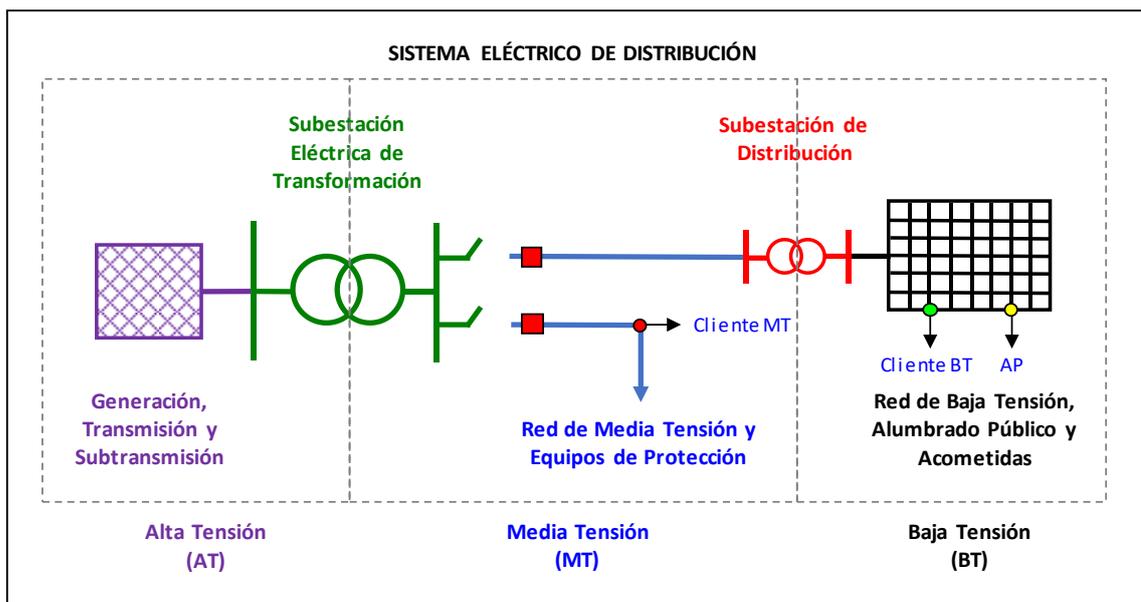


Figura 4: Sistema eléctrico de distribución

(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.3.2.1 Sistema de distribución primaria

Conjunto de conductores eléctricos, estructuras, transformadores, equipos de protección, maniobra y accesorios, proyectado para operar a tensiones normalizadas de

distribución primaria, que parte de un sistema de generación o de un sistema de transmisión, está destinado a alimentar/interconectar una o más subestaciones de distribución; abarca los terminales de salida desde el sistema alimentador hasta los de entrada a la subestación alimentada. (*Norma EC 010, 2006*)

De acuerdo al CNE SUMINISTRO (2011), los niveles de tensión recomendadas son los siguientes: 20.0 kV, 22.9 kV, 33 kV, 22.9 / 13.2 kV, 33 / 19 kV.

Los niveles de tensión que emplea Electrosur S.A. para la distribución primaria son de 10kV y 22.9kV.

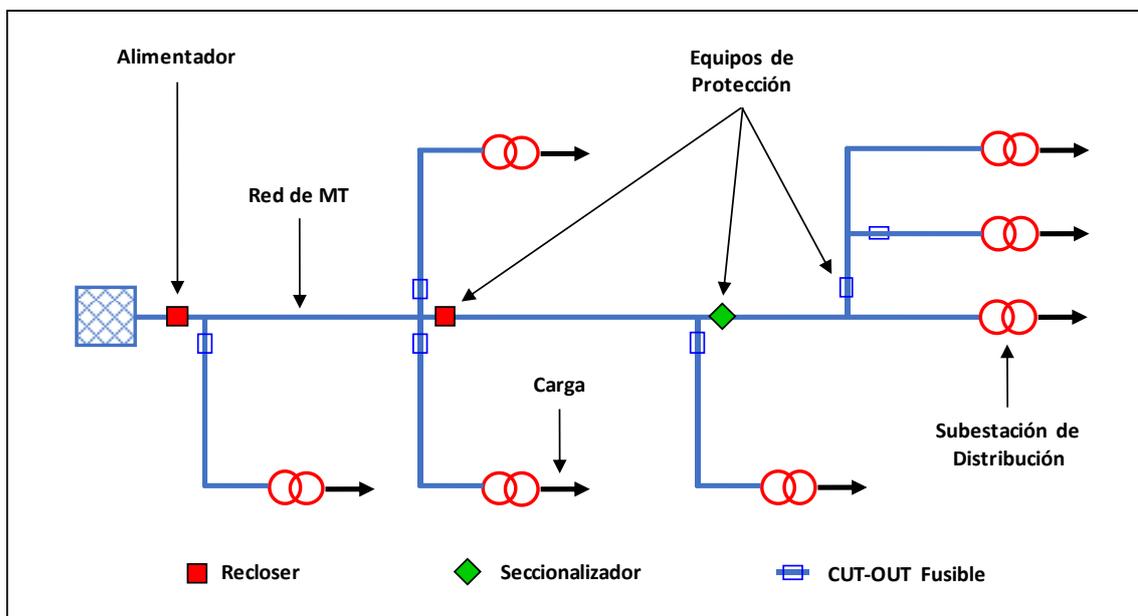


Figura 5: Alimentador en media tensión

(Elaborado por el equipo de trabajo)

La característica que diferencia los alimentadores o los tramos que los componen, es ser aéreos o subterráneos, sobre todo desde el punto de vista de la confiabilidad.

Los tramos aéreos son económicos en su instalación y mantenimiento, pero están más expuestos al medio ambiente, debido por el cual ocurren más fallas en la red eléctrica



a causa de hurto de conductor, distancias de seguridad con respecto a árboles, aproximación entre fases debido al viento, cortocircuitos ocasionados por aves de la zona, entre otros, resultando menos confiables. Sus principales componentes son: estructuras (formadas por postes, crucetas y aisladores), conductores o cables aéreos, seccionadores fusible, seccionalizadores, reconectores, capacitores, reguladores de voltaje y pararrayos. En cambio, las instalaciones subterráneas son más costosas, pero más confiables por estar menos expuestas a factores externos. Sus principales componentes son: terminales, cables subterráneos, empalmes, seccionadores bajo carga, seccionadores bajo carga fusible limitador e interruptores. En el inicio de cada alimentador, casi siempre, existe una protección contra fallas que es capaz de despejar todas las fallas transitorias y detectar las permanentes. Esta protección es esencial y se considera que siempre existe. (Collantes, 2010)

2.3.2.2 Subestación de distribución

Las subestaciones de distribución primaria transforman la energía a un nivel de tensión más baja, adecuada para la distribución local, compuesta por la recepción de las líneas de media tensión, equipos de protección, transformador de reducción y salida de las líneas secundarias. Las subestaciones de distribución reducen la energía de un valor de media tensión al de baja tensión de 380/220V. Sus instalaciones están implementadas con su respectivo centro de control y mantenimiento. (Ordoñez & Nieto, 2010)

Según Rojas (2017) también afirma que, es un conjunto de instalaciones para la transformación y seccionamiento de la energía eléctrica, que recibe de una red de distribución primaria y la entrega a un sistema de distribución primaria (industrias de sistema de utilización) y secundaria (viviendas).



Comprende generalmente el transformador de distribución, equipos de maniobra, protección y control; tanto en el lado primario como en el secundario. De acuerdo a su equipamiento la subestación puede ser:

- Tipo convencional (en caseta a nivel del piso ó en el sotano de edificios)
- Tipo aérea (monoposte ó biposte)
- Tipo compacta (bóveda subterránea ó pedestal a nivel de superficie del piso)

2.3.2.3 Sistema de distribución secundaria

Los sistemas de distribución secundaria comprenden desde la salida del transformador de distribución hasta los puntos de entrega de los clientes. Se componen de circuitos radiales que pueden ser tramos aéreos o subterráneos, con componentes similares a los del sistema de distribución primaria, pero de uso en baja tensión. En algunos casos, los clientes se conectan directamente a la subestación de distribución, no siendo necesario un sistema de distribución secundaria. En la mayoría de los casos, los clientes se conectan a redes en baja tensión que recorren el área de servicio de la subestación. También, se conectan las cargas del alumbrado público para la iluminación de vías públicas, plazas, parques, etc. (*Collantes, 2010*)

Las redes de distribución secundarias son típicamente radiales, esto es, que existe un solo camino entre el transformador de distribución y el consumidor final, en niveles de tensión denominados baja tensión, 380/220V. En algunos casos es posible encontrarse con redes de topología enmallada, sin embargo, en la presente investigación no se tendrán en cuenta. (*Pérez, 2011*)

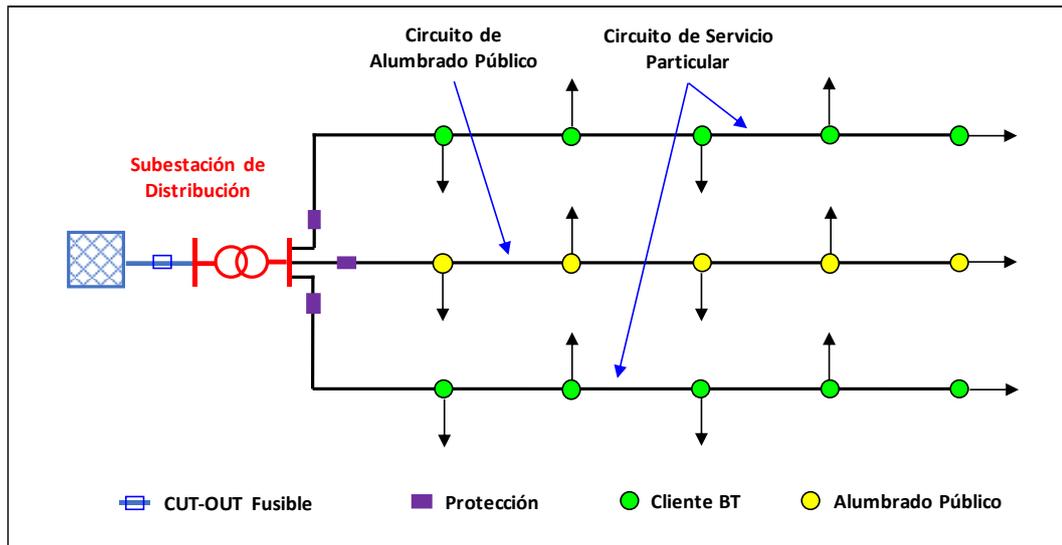


Figura 6: Sistema de distribución secundaria

(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.3.2.4 Equipos de protección en redes de distribución

La protección de las líneas de distribución se realiza a través de equipos diseñados para soportar los esfuerzos por cortocircuito y están dotados con sistemas de control sensibles a corrientes de falla y mecanismos de operación para abrir el circuito y aislar la sección a la cual están conectados. (León & Villón, 2002)

La función principal de un sistema de protección es la de causar la rápida reposición del servicio cuando algún elemento del sistema eléctrico sufre un cortocircuito, o cuando opera de manera anormal. Existe además una función secundaria la cual consiste en proveer indicación de la localización y tipo de falla. (Ramírez, 2018)

2.3.2.4.1 Recloser (reconector)

El reconector es un interruptor instalado en las líneas eléctricas con la función de reconectar el suministro de energía a la red cuando se produce una falla temporal o anomalía en la instalación desconectando el equipo automáticamente toda la red de energía y luego de unos segundos el equipo es capaz de volverlo a conectar

automáticamente. Este dispositivo es capaz de detectar una corriente e interrumpirla y reconectar automáticamente para volver a energizar la línea, cabe decir que protege ante una falla (desenergiza) y vuelve a poner en servicio la línea (energiza) manteniendo las condiciones normales del suministro eléctrico. (RESEAD, 2016)



Figura 7: Recloser RIVE

Fuente: (RESEAD, 2016)

Los reconectores automáticos son reconocidos por las compañías eléctricas de todo el mundo como un equipo esencial para lograr su objetivo principal: proporcionar la máxima continuidad del servicio eléctrico a sus clientes. Los reconectores detectan e interrumpen las corrientes de falla y restablecen automáticamente el servicio después de una interrupción momentánea. Si una falla es permanente, el reconector se bloquea después de un número predeterminado de intentos (generalmente tres o cuatro), aislando la zona de falla. Los reconectores ahorran a las compañías eléctricas tiempo y gastos considerables, ya que permiten que la energía se restablezca automáticamente, después de un parpadeo o dos. Para interrupciones que requieren un equipo de reparación, los

reconectores minimizan el área de interrupción y ayudan a las cuadrillas a localizar rápidamente el problema y restablecer la energía. (*Omega Electric, 2020*)

Este tipo de recloser se encuentra instalado en distintos puntos de la red del sistema eléctrico Yarada.



Figura 8: Recloser (NR002), instalado en la estructura O163-389
(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.3.2.4.2 Seccionalizador automático

Según *RESEAD (2016)* el seccionalizador es un equipo de apertura automático, que funciona en coordinación con interruptores o reconectores aguas arriba que abre sus contactos mientras el circuito este desenergizado por la acción del interruptor, pudiendo aperturar fallas de capacidad mínima, detectando las fallas a tierra monofásica, bifásica y trifásica.

Este equipo es utilizado en redes de distribución para la coordinación de la protección por alta velocidad de operación.



Figura 9: *Seccionalizador automático START*

Fuente: Catalogo RESEAD. reseed.com.pe

Este tipo de seccionalizador se encuentra instalado (existente) en distintos puntos de la red del sistema eléctrico Yarada.



Figura 10: Seccionalizador (SSA01), instalado en la estructura O162-827

(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.3.2.4.3 Seccionador CUT-OUT fusible

Son los equipos más simples y económicos del sistema de protección. Tiene como función principal proteger sobrecorrientes e indicador visible de la operación del fusible para el personal de mantenimiento, pero para que funcionen apropiadamente deben de censar la condición que tratan de proteger, interrumpir la falla rápidamente y coordinar con todos los demás dispositivos de la red. *(Mechán, 2019)*

La principal limitación de un fusible es cuando la corriente que atraviesa por el fusible es superior a su mínima corriente de fusión para la cual fue diseñado, se funde y despeja así la falla de la red, esta interrupción se da hasta que un personal técnico llegue y analice el tipo de falla y reemplace por uno con las mismas características. *(Arce Lazo, 2010)*



Figura 11: Seccionador tipo CUT-OUT (O165-287)

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Se utilizan para redes de distribución aérea en media tensión y para la protección de transformadores de distribución y derivaciones de redes de media tensión, proporcionando protección contra cortocircuitos y sobrecargas e indicación visible de la operación del fusible. El corte se ejecuta con la expulsión de gases durante la interrupción desde la parte inferior del tubo porta fusible. (COEPER PERU, 2019)

2.3.2.5 Equipos de seccionamiento

Son equipos de maniobra que se utilizan para abrir o cerrar un circuito con una corriente despreciable ya sea en alta o media tensión, se deben fijar las características eléctricas, mecánicas y dimensionales que deben cumplir para uso en la intemperie, así como establecer los ensayos y controles de calidad que deben satisfacer. Llamaremos equipos de seccionamiento o de maniobra al aparato mecánico de conexión, capaz de

establecer y soportar corrientes en las condiciones normales de circuito, incluyendo eventualmente condiciones especificadas de sobrecarga, también soportar por un lapso de tiempo corrientes anormales (tales como las de cortocircuito). Este aparato también puede ser llamado a establecer (pero no interrumpir) corrientes de cortocircuito. (Hernández, 2011)

2.3.2.5.1 Seccionador tipo cuchilla

Según el *Grupo EPM (2018)* los seccionadores monopolares tipo cuchilla, son equipos que se usan para la conexión y desconexión de diversas partes de una instalación eléctrica, para realizar las maniobras de operación o de mantenimiento. La finalidad de estos equipos es la de aislar tramos de circuitos de una forma visible. Los circuitos que debe interrumpir deben estar libres de corriente, en otras palabras, el seccionador se debe maniobrar sin carga; sin embargo, se puede operar bajo carga con equipos adicionales que permitan efectuar dicha operación. Los seccionadores cuchilla monopolares, son de uso exterior, montados en posición vertical u horizontal invertido. Este tipo de cuchillas se encuentran sostenidas mecánicamente y pueden operarse ya sea automática o manualmente.

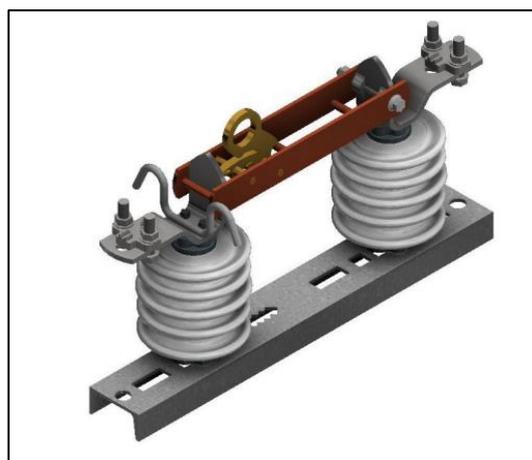


Figura 12: Seccionador monopolar tipo cuchilla

Fuente: (Grupo EPM, 2018)

Este tipo de seccionador tipo cuchilla se encuentra instalado (existente) en las salidas del alimentador del sistema eléctrico Yarada, sin embargo, en la presente investigación no se tendrán en cuenta, debido a que este equipo nos es considerado de protección.



Figura 13: Seccionador tipo cuchilla, instalado en la estructura O164-1020

(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.4 CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

La confiabilidad en sistemas de distribución se relaciona con la probabilidad o capacidad de funcionamiento que tiene este sistema de proveer adecuadamente el suministro de energía eléctrica a los usuarios dentro de los estándares aceptados y de calidad deseada. La confiabilidad es medida a través de unos índices como son; SAIFI y SAIDI. *(Gonzales, 2007)*

La confiabilidad es influenciada por la demanda, antigüedad de redes y su expansión, cantidad de equipos de protección y su ubicación. Por lo que, se requiere una

verificación periódica del cumplimiento del equipamiento existente y decidir reubicaciones y/o nuevas ubicaciones para obtener el máximo beneficio. (SINGELEC, 2021)

La confiabilidad tiene que ver con la suficiencia, seguridad y calidad. Los atributos del sistema eléctrico relacionados a la confiabilidad, queda representado por el esquema como se muestra en la siguiente figura. (Díaz, 2000)

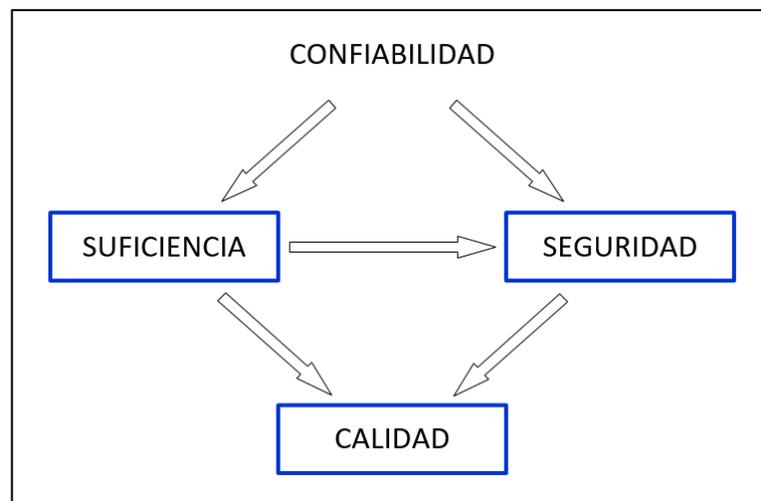


Figura 14: Atributos del sistema eléctrico relacionados a la confiabilidad
(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.4.1 Suficiencia

Es el atributo del sistema eléctrico cuyas instalaciones son adecuadas para satisfacer la demanda total y las restricciones operacionales del sistema. Esto incluye la existencia de unidades de generación para suplir la demanda y la existencia de redes de transmisión, sub transmisión y distribución adecuadas para transportar la energía eléctrica hasta los puntos de consumo. (Díaz, 2000)

2.4.2 Seguridad

Aspecto relacionado a la capacidad de soportar contingencias (refleja una característica dinámica), es decir la capacidad de respuesta del sistema frente a una determinada contingencia o a un conjunto de éstas. (*Rudnick & Watts, 2004*)

2.4.3 Calidad

Tiene relación con el servicio que se presta, especialmente se refiere a la característica técnica de la onda (voltaje, corriente) y la continuidad del suministro eléctrico, como también la atención que recibe el consumidor final. (*Díaz, 2000*)

2.5 ENFOQUES PARA LA EVALUACIÓN DE CONFIABILIDAD

2.5.1 Enfoque probabilístico

Según el autor *Muñoz (2018)* afirma que el enfoque probalístico consiste en simular de forma estocastica diferentes casos de operación, el método de simulación comprende en la mayoría de los casos el método probabilístico de Monte Carlo. El método es utilizado para sistemas en que las fallas dominantes son las de generación. La ventaja principal de este método es la facilidad que ofrece de poder tener en cuenta cualquier variable aleatoria y cualquier contingencia y la posibilidad de adoptar políticas de operación similares a las reales. Sin embargo, el tiempo de cálculo es bastante largo.

Enfoques probabilísticos a considerar:

- Tasa de falla y duración de reparación del componente.
- Duración prevista según el programa de indisponibilidades (mantenimiento).
- Esquemas de protección.
- Tiempo previsto para apertura/cierre de interruptores.
- Generación y cargas esperadas (características).

Resultado de la evaluación de la confiabilidad:

- Índices del sistema.



- índices de punto de carga.
- etc.

2.5.2 Enfoque determinístico

Según el autor *Fernández (2014)* afirma que este método se basa en el análisis de un reducido conjunto de situaciones restrictivas, para poner a prueba el desempeño del sistema. En la práctica, los criterios de confiabilidad determinista han sido utilizados por mucho tiempo, el enfoque más conocido es el criterio (n-1).

Una red cumple con los requisitos del criterio (n-1) cuando producida una falla de cualquiera de los componentes:

- No se producen interrupciones de suministro de las conexiones a los clientes.
- No se producen violaciones permanentes de los límites relativos a las tensiones de operación y a los niveles de carga de los equipos.

En las redes de distribución, se permiten interrupciones en el suministro a corto plazo de un número limitado de clientes:

- Una red de distribución cumple con los requisitos del criterio (n-1), si después de la falla de algún equipo eléctrico, la restauración, conduce al suministro de energía completamente, sin restricciones.

2.6 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

El método de modelamiento a utilizar depende de la información que se disponga para realizar la evaluación de confiabilidad. Para efectos de cálculo de confiabilidad que muestran cuantitativamente los valores aceptables de fallas. (*Fernández, 2014*)

2.6.1 Método analítico

El método analítico, representa cada elemento del sistema a través de un modelo matemático que pueden resolverse para diferentes valores de las variables de entrada, y

así evaluar los índices de confiabilidad usando soluciones matemáticas directas. (Flores, 2015)

Los autores *Chowdhury & Koval (2009)* indican que el método analítico los estados del sistema se generan por medio de combinaciones de los diferentes estados de los componentes, estos componentes se modelan por medio de la razón de cambio entre los diferentes estados (Método Markov).

Los siguientes métodos son los más usados para el análisis de confiabilidad en sistemas de distribución.

- Método del análisis de red (conexiones en serie o paralelo).
- Método de estados (enumeración de estados).

2.6.1.1 *Proceso Markov*

Según *Gómez (2002)* afirma que un componente del sistema eléctrico se puede modelar por dos estados complementarios: disponible o indisponible. El componente pasará estado indisponible tras sufrir una falla, volviendo a estar disponible tras la reparación. La transición entre estados se representa mediante un modelo de Markov, siendo: Tasa de falla (λ) y la tasa de reparación (μ).

El sistema de suministro de energía es descrito a través de variables de estado y todas las transiciones posibles de un estado en otro.

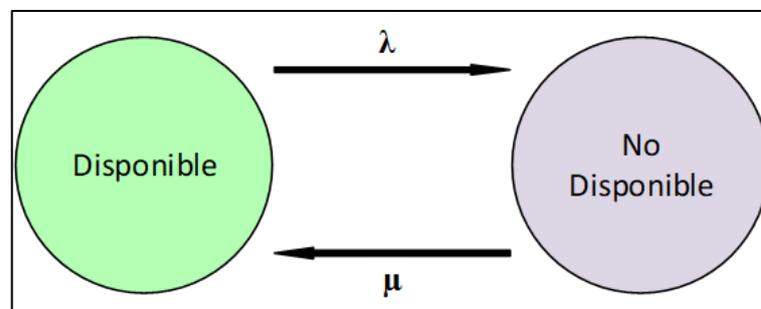


Figura 15: Modelo de Markov para un componente con dos estados

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Las tasas de transición se definen como:

Tasa de falla;

$$\lambda = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de fallas del sistema durante el periodo considerado}}{\text{Tiempo total durante el cual el sistema estaba expuesto a falla}} \quad (1)$$

Tasa de reparación;

$$\mu = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de reparaciones del sistema durante el periodo considerado}}{\text{Tiempo total durante el cual el sistema estaba siendo reparado}} \quad (2)$$

2.6.2 Método de enumeración de estados

EL método de enumeración de estados analiza uno tras otro, todos los estados relevantes en el sistema, este método es bastante efectivo, arroja resultados exactos y es bastante flexible. El inconveniente que surge de este método es la dimensionalidad que adquiere el problema, dado que la cantidad de estados factibles crece exponencialmente tanto con el número de componentes presentes como con el número de estados que cada componente puede tomar. (Fernández, 2014)

En la siguiente tabla, se muestra un ejemplo del número de estados que cada componente puede tomar.

Number of Components	Number of Possible States
1	2
2	4
4	16
5	32
10	1024
20	1,048,576
25	33,554,432
50	1,125,899,906,842,620
60	1,152,921,504,606,850,000
75	37,778,931,862,957,200,000,000
90	1,237,940,039,285,380,000,000,000
100	1,267,650,600,228,230,000,000,000,000

Figura 16: Número de estados posibles para una cierta cantidad de componentes

FUENTE: (Chowdhury & Koval, 2009)

2.6.3 Método con diagrama de bloques

Los diagramas de bloques posibilitan una representación gráfica del comportamiento estocástico del sistema, en otras palabras, el método de diagrama de bloques consiste en obtener el valor de confiabilidad de cada elemento del sistema y posteriormente se encuentra la confiabilidad correspondiente a cada subsistema, al reducir el sistema a un arreglo equivalente conforme a los sistemas en serie y paralelo.

(Flores, Torres, Rodríguez, & Alcaraz, 2010)

2.6.3.1 Sistemas en serie

Según los autores *Chowdhury & Koval (2009)* indican que este tipo de sistema se caracteriza por que la confiabilidad depende del funcionamiento de cada elemento o componente que lo forman, puesto que se requiere que todos estén en funcionamiento para que el sistema funcione correctamente, es decir, si un elemento llega a fallar todo el sistema también falla.

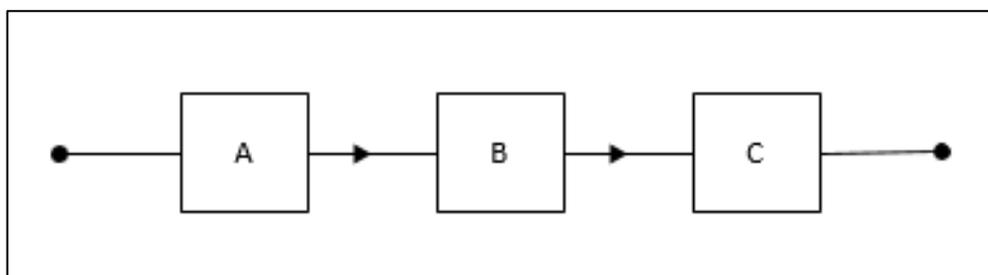


Figura 17: Conexión en serie

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Cada componente de un sistema tiene su propia tasa de falla " λ " y la confiabilidad "R". La tasa de falla y la confiabilidad del sistema dependen de la de los componentes individuales. Si tenemos "n" componentes en serie, podemos decir que la probabilidad de operación se define por:



$$R_{serie} = R_A \times R_B \times R_C \dots \times R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

Donde:

- $R_A, R_B, R_C, \dots, R_n$; es la probabilidad de funcionamiento exitoso de los componentes A, B, C, ..., n respectivamente (confiabilidad).
- n; es el número de componentes del sistema.

La suma del éxito (confiabilidad) y el fracaso (falta de confiabilidad) de todos los componentes del sistema es igual a la unidad ya que son mutuamente excluyentes y complementarios, se expresa de la siguiente manera:

$$R_A + Q_A = 1;$$

$$R_B + Q_B = 1;$$

$$R_C + Q_C = 1;$$

Resumiendo;

$$R_i + Q_i = 1 \quad (4)$$

- $Q_A, R_B, R_C, \dots, R_n$; es la probabilidad de falla (fracaso) de los componentes A, B, C, ..., n respectivamente (falta de confiabilidad).

De la ecuación (4), podemos determinar que la falta de confiabilidad de un sistema en serie es:

$$Q_{serie} = 1 - R_A \times R_B \times R_C \dots \times R_n$$

Resumiendo;

$$Q_{serie} = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \quad (5)$$

2.6.3.2 Sistemas en paralelo

Un sistema en paralelo significa que solo uno de los componentes se encuentre en operación para que el sistema funcione correctamente. (Chowdhury & Koval, 2009)

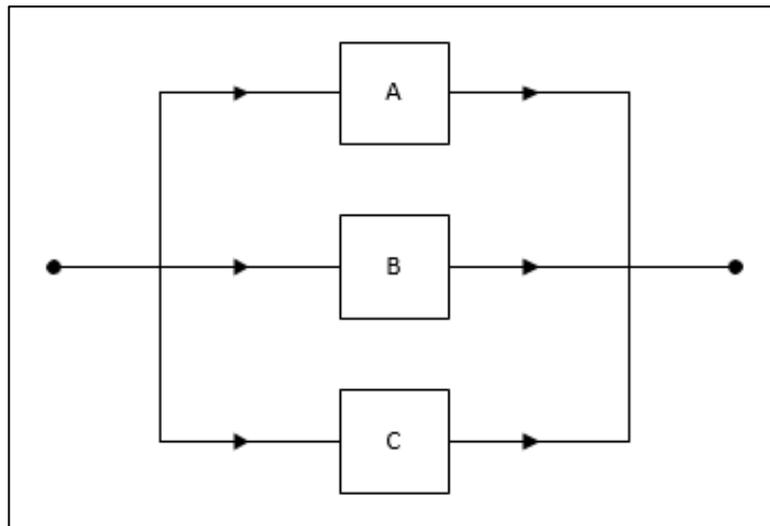


Figura 18: Conexión en paralelo

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Según Chamorro (2017) indica que solo se requiere un elemento en operación para que el sistema funcione, los otros elementos son redundantes. Es la redundancia lo que hace el sistema en general una confiabilidad alta, porque para que el sistema falle, todos los elementos en la conexión paralela tienen que fallar.

Podemos decir entonces que, un sistema en paralelo es redundante y se caracteriza porque la confiabilidad aumenta a medida que se incrementa el número de componentes en paralelo.

Si las fallas son independientes, la probabilidad de que todas fallen será igual al producto de las probabilidades de falla de todos los elementos individuales, que se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{\text{paralelo}} = Q_A \times Q_B \times Q_C \times \dots \times Q_n = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (6)$$

Donde:

- $Q_A, Q_B, Q_C, \dots, Q_n$; es la probabilidad de falla (fracaso) de los componentes A, B, C, ..., n respectivamente (falta de confiabilidad).
- n; es el número de componentes del sistema.

2.7 ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Ayre (2005) indica que para mejorar la confiabilidad de un sistema de distribución se tiene tres alternativas de solución:

- Reducir la frecuencia de interrupción.
- Reducir el tiempo de interrupción
- Reducir el impacto de interrupción.

2.7.1 Reducir la frecuencia de interrupción

Esto se basa en reducir la cantidad de interrupciones que ha sufrido una red de distribución en un periodo determinado, para ello se deben realizar el manteniendo preventivo en los componentes de la red de distribución, como por ejemplo realizar trabajos de poda de árboles que se encuentran cerca de las redes de distribución, esto con la finalidad de evitar una salida permanente del sistema. (*Quispe, 2019*)

Las principales alternativas de solución para reducir la frecuencia de interrupción se muestran en el siguiente esquema.

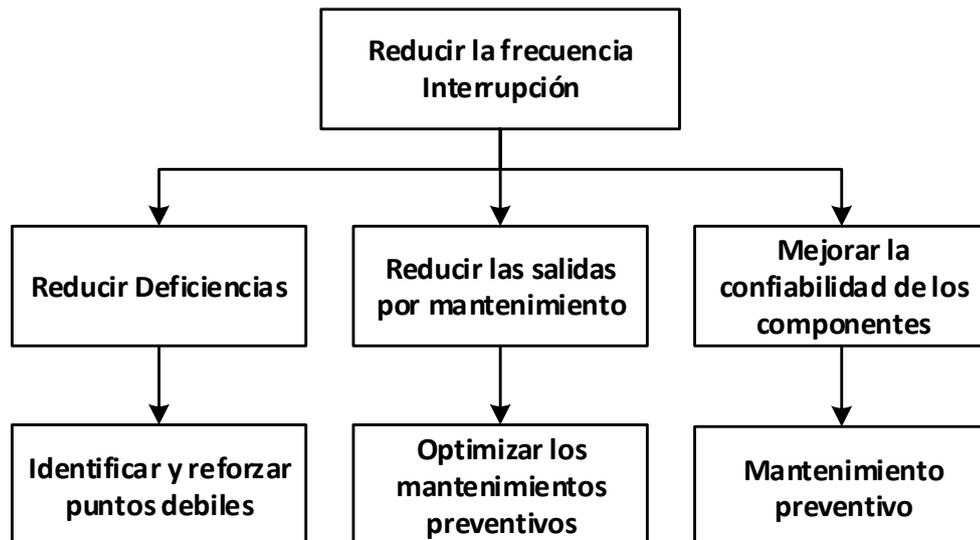


Figura 19: Alternativas para reducir la frecuencia de interrupción

(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.7.2 Reducir el tiempo de interrupción

Esto se basa en reducir el tiempo que se toma desde que inicia la interrupción hasta que se restablece el suministro eléctrico, esto comprende la búsqueda de punto de apertura, búsqueda punto de falla, reparación del elemento fallado y retorno a las condiciones normales. Para reducir este tiempo se pueden trabajar mediante distintas alternativas, uno de los más destacados es automatizar los equipos de maniobras de la red, es decir realizar una maniobra de forma remota. (Ayre, 2005)

Las principales alternativas de solución para reducir el tiempo de interrupción se muestran en el siguiente esquema.

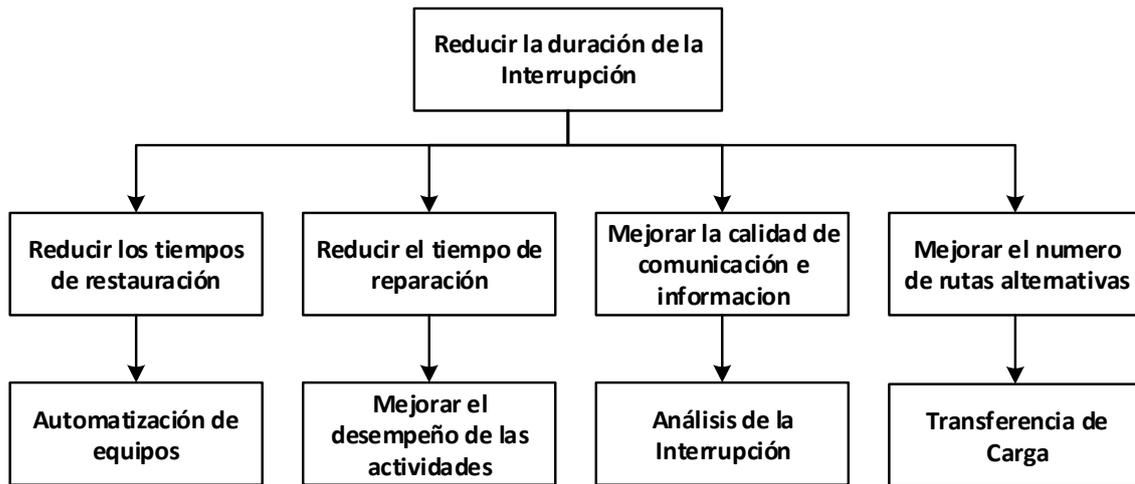


Figura 20: Alternativas para reducir la duración de la interrupción

(Elaborado por el equipo de trabajo)

2.7.3 Reducir el impacto de interrupción

Cuando se presente una falla en la red de distribución y que esta no pueda ser aislado debido a una inadecuada coordinación de protección, puede afectar a usuarios que estén distantes de la falla, una de las maneras de reducir este impacto de la interrupción es mejorar la selectividad en el sistema de protección, como también puede ser el caso de que no se cuente un equipo de protección para que aisle la falla, para ello se debe incrementar los equipos de protección. *(Muñoz, 2018)*

Las principales alternativas de solución para reducir el impacto de interrupción se muestran en el siguiente esquema.

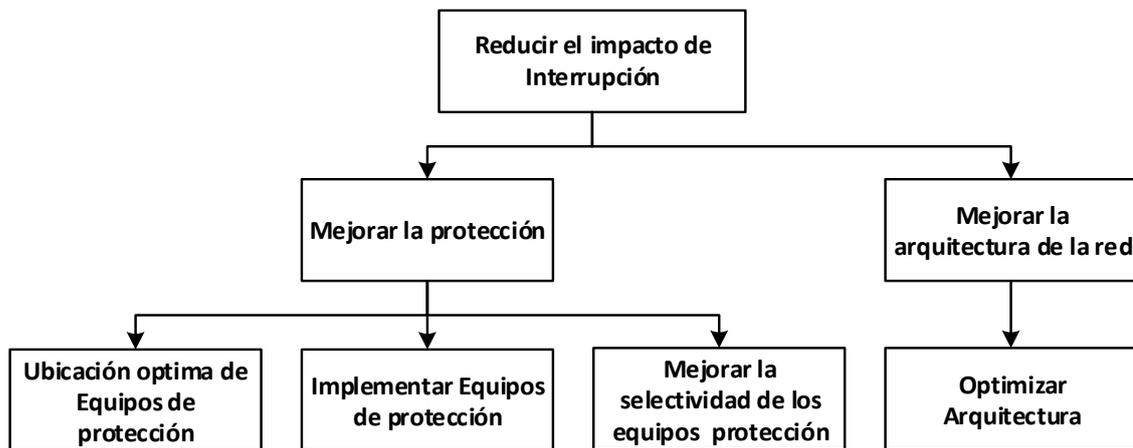


Figura 21: Alternativas para reducir el impacto de la interrupción

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Con el presente trabajo de investigación se pretende mejorar el impacto de la interrupción mediante la ubicación optima de equipos de protección.

2.8 PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD

Según los autores *Salazar, Chusin & Escobar (2015)* afirman que para poder realizar la evaluación de la confiabilidad orientado al cálculo de los índices de confiabilidad de un sistema eléctrico de distribución, se requiere datos para los elementos que componen la red de distribución, los cuales son tasa de falla y tiempo de reparación.

Para caracterizar los tramos de un alimentador de distribución y equipos de protección considerados, se caracterizan por los siguientes parámetros.

2.8.1 Tasa de falla

Según *Sayas (2013)* afirma que la tasa de falla es el número de fallas de un componente por año causado por una salida permanente. Estas fallas pueden ser causadas por una mala operación, descargas atmosféricas, aves, cometas, caída de árbol, hurto de conductor, bajo nivel de aislamiento, etc.

La tasa de fallas para componentes individuales, tales como son: barras, interruptores, transformador, seccionadores, etc. es obtenida al dividir el número de

ocurrencias de fallas de un componente dado entre el total de los componentes expuesto a falla por un periodo de tiempo y se plantea la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{m}{N \times T} \left[\frac{\text{fallas}}{\text{año}} \right] \quad (7)$$

Donde:

- ✓ m; es la cantidad de fallas observadas para cierto tipo de componente.
- ✓ N; es la cantidad de componentes expuesto a falla.
- ✓ T; es el periodo de estudio, años.

En base al procedimiento *OSINERG N° 074-OS/CD (2004)*, se considera una salida permanente a la interrupción del suministro eléctrico cuya duración sea igual o mayor a 3 (tres) minutos.

Según *Arriagada (1994)* la tasa de falla para tramos de un alimentador de distribución, se puede determinar a partir de un registro historial de interrupciones y aplicando las siguientes fórmulas:

$$\lambda = b \times l \left(\frac{\text{falla}}{\text{año}} \right) \quad (8)$$

$$b = \frac{m}{L \times T} \left(\frac{\text{falla}}{\text{km. año}} \right) \quad (9)$$

Donde:

- ✓ m; es la cantidad de fallas.
- ✓ L; es la longitud total de las líneas expuestas a falla, en km.
- ✓ T; es el periodo de estudio, años.
- ✓ b; es el número de fallas, por kilómetro al año.
- ✓ l; es la longitud de la línea de interés.

Ejemplo de cálculo de la tasa de falla:

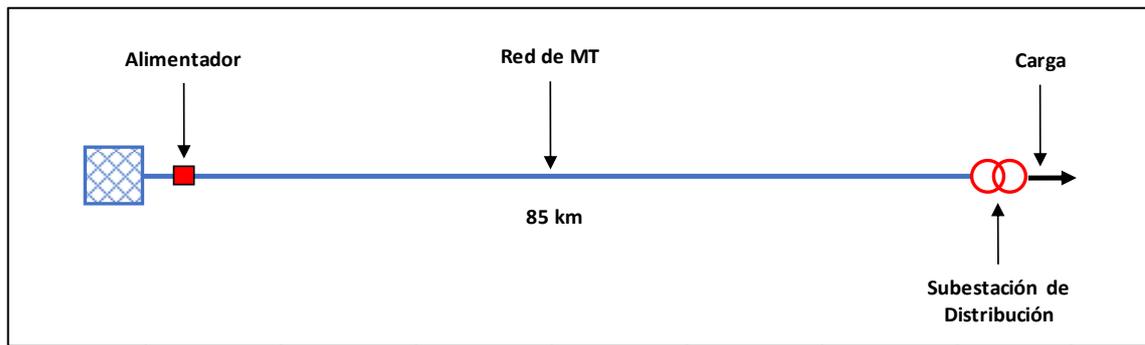


Figura 22: Red de media tensión simple
(Elaborado por el equipo de trabajo)

- Numero de fallas: 25
- Periodo de análisis: 1 año
- Distancia del alimentador: 85km

$$b = \frac{25}{85 \times 1} = 0.29 \left(\frac{\text{falla}}{\text{km. año}} \right)$$

2.8.2 Tiempo de reparación

Según *Sayas (2013)* el tiempo de reparación representa la acción de cambio o reparación del componente causante de la interrupción del servicio, también representa el periodo transcurrido desde la desconexión del circuito hasta la reenergización del mismo.

- Tasa de reparación; μ =constante
- Tiempo de reparación; $R=1/\mu$

Según *Chamorro (2017)* para un tramo de un alimentador, el tiempo de interrupción es dependiente del componente de protección que está asociada a la interrupción, así como también de las acciones que se toman para reanudar el servicio eléctrico, como es el caso de maniobras de transferencia, reparaciones, traslado de personal y de equipos, etc.

En una red de distribución cualquiera, se tiene la siguiente clasificación de tiempos donde podemos apreciar en la siguiente figura.

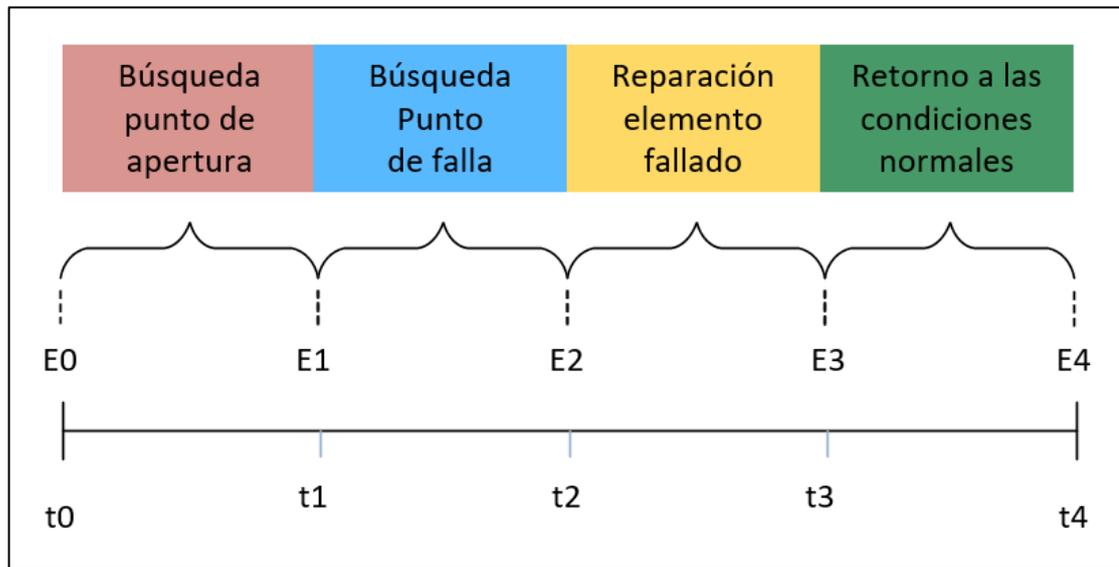


Figura 23: Eventos de una interrupción imprevista

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Ejemplo de cálculo de tiempo de reparación:

Del ejemplo anterior de la línea (figura 19), calculamos el tiempo de reparación sabiendo que:

- Duración total de interrupción en el año: 15 horas
- Numero de fallas: 25

$$r = \frac{\text{Tiempo total fuera de servicio}}{\text{Número de fallas}} \left(\frac{\text{horas}}{\text{interrupción}} \right) \quad (10)$$

$$r = \frac{15}{25} = 0.6 \left(\frac{\text{horas}}{\text{interrupción}} \right)$$

2.8.3 Indisponibilidad

Según SINGELEC (2021) la indisponibilidad esta como el tiempo en que un componente no se encuentra disponible para realizar su función por algún evento o falla.

$$U_i = \frac{\text{Tiempo total de desconexion forzada en "n" años}}{n} \left(\frac{\text{horas}}{\text{año}} \right) \quad (11)$$

Donde:

- n; es el número de años evaluados.

2.9 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD

Los índices de confiabilidad utilizados para redes eléctricas pretenden cuantificar la calidad del servicio que presenta la red en cualquier punto de consumo. (Ayre, 2005)

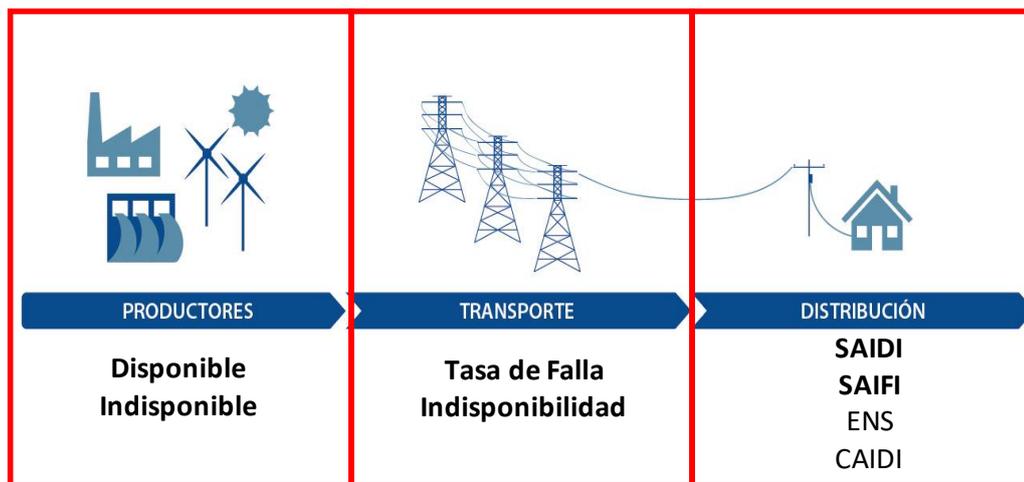


Figura 24: Índices de confiabilidad del sistema eléctrico

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Según Sayas (2013) indica que la fuente básica para obtener los índices de confiabilidad son la tasa de fallas y tiempo de reparación. En la siguiente figura se muestra los dos parámetros a considerar para poder realizar el cálculo de confiabilidad y los resultados que se obtienen.

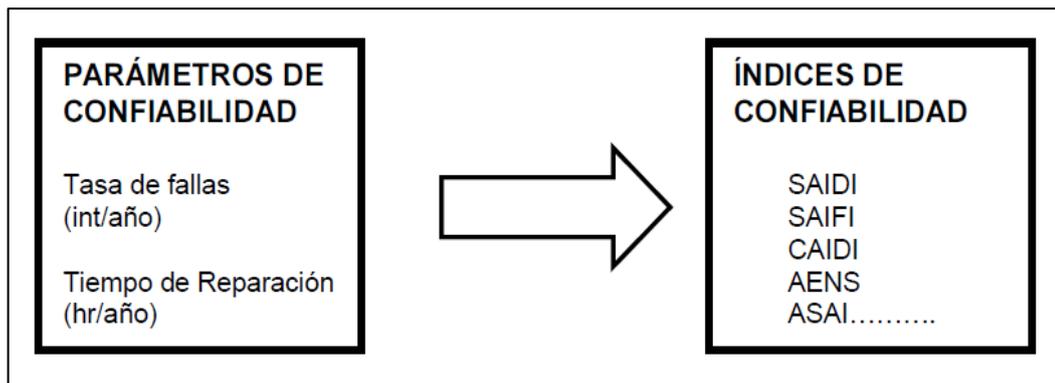


Figura 25: Parámetros para el cálculo de la confiabilidad y sus resultados

Fuente: (Sayas, 2013)

De acuerdo a la norma *IEEE STANDARD 1366 (2012)*, Guide for Electric Power Distribution Reliability Índices, se especifican 13 índices de confiabilidad las cuales se hallan agrupadas dentro de la clasificación indicada líneas arriba, destacándose las siete (7) más importantes, que se detallan a continuación:

- **SAIFI** (índice de frecuencia de interrupciones promedio del sistema).
- **SAIDI** (índice de duración de interrupciones promedio del sistema).
- **CAIDI** (índice de duración de interrupción promedio por cliente interrumpido).
- **CAIFI** (Índice de Frecuencia de Interrupción Promedio del Cliente).
- **ASAI** (índice de disponibilidad promedio del servicio).
- **ASIFI** (índice de frecuencia de interrupciones promedio del sistema por kVA conectado).
- **ASIDI** (índice de duración de interrupciones promedio del sistema por kVA conectado).

Para el presente trabajo de investigación, utilizamos principalmente los siguientes indicadores.

2.9.1 Índice de confiabilidad SAIFI

Según el procedimiento *OSINERG N° 074-OS/CD (2004)* el Índice de Frecuencia de Interrupción Promedio del Sistema (SAIFI) indica con qué frecuencia el cliente promedio experimenta una interrupción sostenida durante un periodo de tiempo predefinido. Matemáticamente, esto se da en la siguiente ecuación.

$$SAIFI = \frac{\sum \text{Numero Total de Clientes Interrumpidos}}{\text{Numero Total de Clientes Atendidos}} \quad (\text{veces}) \quad (12)$$

2.9.2 Índice de confiabilidad SAIDI

Según *OSINERG N° 074-OS/CD (2004)* el Índice de Duración de Interrupción Promedio del Sistema (SAIDI) indica la duración total de la interrupción para el cliente promedio durante un período de tiempo predefinido. Se mide comúnmente en minutos u horas de interrupción. Matemáticamente, esto se da en la siguiente ecuación.

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Tiempo de interrupcion a los usuarios}}{\text{Numero Total de Clientes Atendidos}} \quad (\text{horas}) \quad (13)$$

2.10 CÁLCULO DE LA CONFIABILIDAD

Para evaluar la confiabilidad de los sistemas eléctricos de distribución, se usan principalmente los indicadores SAIFI y SAIDI. A continuación, se desarrolla un ejemplo de aplicación en base al artículo de R. Billinton and E. Wojczynski llamado “*Distributional Variation of Distribution System Reability Indices*”.

Ejemplo de aplicación 01:

En este ejemplo se desarrolla el cálculo de confiabilidad en base al artículo de R. Billinton and E. Wojczynski llamado “*Distributional Variation of Distribution System Reability Indices*”. Se desarrolla un ejemplo del cálculo de confiabilidad mediante:

- Cálculo de confiabilidad mediante un registro de interrupciones.
- Cálculo de confiabilidad manualmente.

- Cálculo de confiabilidad con el Software DigSilent Power Factory

para ello se ha tomado como sistema de prueba la configuración radial de distribución simple como muestra la siguiente figura, luego compararemos los resultados de los indicadores SAIDI y SAIFI con los tres métodos de cálculo.

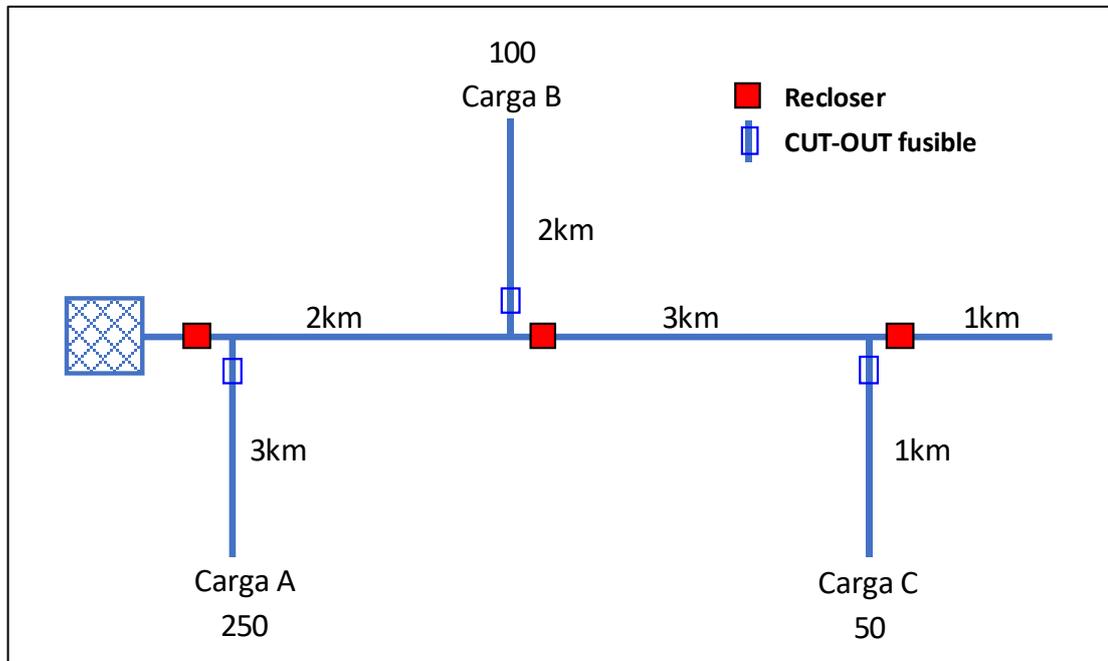


Figura 26: Configuración radial Simple

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En este sistema de prueba, los equipos de protección están normalmente cerrados y los puntos de carga A, B y C se alimentan de los tramos troncales mediante fusibles laterales.

Se asume que los puntos de carga A, B y C tienen 250, 100 y 50 clientes respectivamente.

2.10.1 Cálculo de confiabilidad mediante un registro de interrupciones

Las empresas concesionarias de distribución realizan el cálculo de los índices de confiabilidad SAIFI y SAIDI en base al procedimiento aprobado con resolución Osinergmin N° 074-OS/CD.

Empresa	Sistema Eléctrico	Alimentador	Código Interrupcion Empresa	Causa	Inicio	Fin	Afectados	Duracion	Código Instalacion Salto	Total Usuarios SELEC
ELS	SE0113	O-161	48163	Por Expansión o reforzamiento de redes	03/03/2019 05:30	03/03/2019 13:34	368	8.07	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	48441	Por Expansión o reforzamiento de redes	13/04/2019 04:00	13/04/2019 08:55	368	4.92	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	48613	Bajo nivel de aislamiento(Aislador Roto/Tensión Inadecuada)	26/05/2019 06:04	26/05/2019 06:21	368	0.28	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	48634	Por Expansión o reforzamiento de redes	02/06/2019 05:00	02/06/2019 10:03	368	5.05	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	48938	Por Expansión o reforzamiento de redes	21/07/2019 05:00	21/07/2019 11:42	368	6.70	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49177	Bajo nivel de aislamiento(Aislador Roto/Tensión Inadecuada)	20/08/2019 13:17	20/08/2019 14:50	368	1.55	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49520	Caída de conductor de red	19/10/2019 13:29	19/10/2019 13:38	368	0.15	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49532	Por Expansión o reforzamiento de redes	26/10/2019 07:00	26/10/2019 12:00	368	5.00	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49551	Bajo nivel de aislamiento(Aislador Roto/Tensión Inadecuada)	28/10/2019 14:25	28/10/2019 14:33	368	0.13	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49561	Bajo nivel de aislamiento(Aislador Roto/Tensión Inadecuada)	30/10/2019 12:08	30/10/2019 12:19	368	0.18	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49563	Corte de emergencia(No incluidos en PM y PE)	30/10/2019 17:00	30/10/2019 17:39	368	0.65	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49745	Corte de emergencia(No incluidos en PM y PE)	01/12/2019 22:16	01/12/2019 22:26	368	0.17	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49827	Bajo nivel de aislamiento(Aislador Roto/Tensión Inadecuada)	16/12/2019 00:14	16/12/2019 01:14	368	1.00	O-161	4108
ELS	SE0113	O-161	49641	Por Expansión o reforzamiento de redes	20/11/2019 16:00	20/11/2019 17:10	90	1.17	PS055	4108
ELS	SE0113	O-161	48430	Caída de conductor de red	07/04/2019 05:24	07/04/2019 06:24	251	1.00	PSA030	4108
ELS	SE0113	O-162	49741	Bajo nivel de aislamiento(Aislador Roto/Tensión Inadecuada)	01/12/2019 08:04	01/12/2019 09:30	38	1.43	SSA02	4108
ELS	SE0113	O-162	48083	Falla equipo(transformador, interruptor, seccionador de potencia)	18/02/2019 06:45	18/02/2019 08:25	98	1.67	SSA01	4108

Figura 27: Ejemplo de reporte de interrupciones

(Elaborado por el equipo de trabajo)

De la misma forma, mediante un registro de interrupciones modelo y utilizando las ecuaciones (12) y (13), se procedió a calcular los valores del SAIFI y SAIDI

Tabla 1: Cálculo de confiabilidad mediante un registro de interrupciones

Estadística por año								
Sección	Horas (h)	Long (km)	Afectados	Total Usuarios	SAIFI	SAIDI	λ (f/km/año)	r (h)
T(2km)	0.5	2	400	400	1	0.5	1.0	0.5
T(2km)	0.5		400	400	1	0.5		
T(3km)	1	3	50	400	0.125	0.125	1.0	1.0
T(3km)	1		50	400	0.125	0.125		
T(1km)	2	1	0	400	0	0	3.0	2.0
T(1km)	2		0	400	0	0		
L(A)	1	3	250	400	0.625	0.625	1.0	1.0
L(A)	1		250	400	0.625	0.625		
T(A)	1		250	400	0.625	0.625		
L(B)	2	2	100	400	0.25	0.5	1.5	2.0
L(B)	2		100	400	0.25	0.5		
L(C)	3	1	50	400	0.125	0.375	4.0	3.0
L(C)	3		50	400	0.125	0.375		
L(C)	3		50	400	0.125	0.375		
Total ALM					5.50	6.25		

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Entonces, los índices de confiabilidad calculados mediante un registro de interrupciones son:

$$SAIFI = 5.50$$

$$SAIDI = 6.25$$

2.10.2 Cálculo de confiabilidad manualmente

Este cálculo se realiza en base al artículo de R. Billinton and E. Wojczynski llamado “Distributional Variation of Distribution System Reability Indices”.

Utilizando las siguientes ecuaciones básicas, se construye la siguiente tabla.

$$\lambda_s = \sum \lambda_i \left(\frac{\text{fallas}}{\text{año}} \right) \quad (14)$$

$$r_s = \frac{\sum \lambda_i \times r_i}{\sum \lambda_i} \left(\frac{\text{horas}}{\text{falla}} \right) \quad (15)$$

$$U_s = \lambda_s \times r_s \left(\frac{\text{horas}}{\text{año}} \right) \quad (16)$$

Tabla 2: Procedimiento de cálculo manualmente

Cálculo del caso base									
Sección	Carga A			Carga B			Carga C		
	λ (f/año)	r (h)	λr (h/año)	λ (f/año)	r (h)	λr (h/año)	λ (f/año)	r (h)	λr (h/año)
Troncal									
(km)									
2	2.0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0
3	-	-	-	-	-	-	3.0	1.0	3.0
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lateral									
(km)									
3	3.0	1.0	3.0	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	3.0	2.0	6.0	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	4.0	3.0	12.0
Total	5.00	0.80	4.00	5.00	1.40	7.00	9.00	1.78	16.00

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Resumiendo, los resultados, se obtiene lo siguiente:

Tabla 3: Cálculo de parámetros de confiabilidad por cada punto de carga

Parámetros	Carga A	Carga B	Carga C
λ - fallas/año	5.00	5.00	9.00
r- horas/falla	0.80	1.40	1.78
U- horas/año	4.00	7.00	16.00

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Es posible calcular manualmente los índices de confiabilidad a través de las siguientes ecuaciones:

$$SAIFI = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times \frac{N_i}{N_T} \quad (17)$$

$$SAIDI = \sum_{i=1}^n r_i \times \frac{N_i}{N_T} \quad (18)$$

Donde:

λ_i : Tasa de falla del tramo

r_i : Tiempo de reparación

N_i : Número de clientes

N_T : Número total de clientes del sistema

n: Número de eventos

Estas ecuaciones se desarrollaron según la tabla 2 del artículo de R. Billinton and E. Wojczynski llamado “Distributional Variation of Distribution System Reability Indices”

Entonces, los índices de confiabilidad calculados manualmente son:

Utilizando la ecuación (17), hallamos el valor de SAIFI:

$$SAIFI = \frac{(250)(5.00) + (100)(5.00) + (50)(9.00)}{250 + 100 + 50}$$

$$SAIFI = \frac{2200}{400} = \mathbf{5.50}$$

Utilizando la ecuación (18), hallamos el valor de SAIDI:

$$SAIDI = \frac{(250)(4.00) + (100)(7.00) + (50)(16.00)}{250 + 100 + 50}$$

$$SAIDI = \frac{2500}{400} = \mathbf{6.25}$$

2.10.3 Cálculo de confiabilidad con el software DigSilent Power Factory

Para realizar el cálculo de confiabilidad mediante el software DigSilent Power Factory se debe seguir el siguiente procedimiento como muestra el siguiente diagrama de flujo.

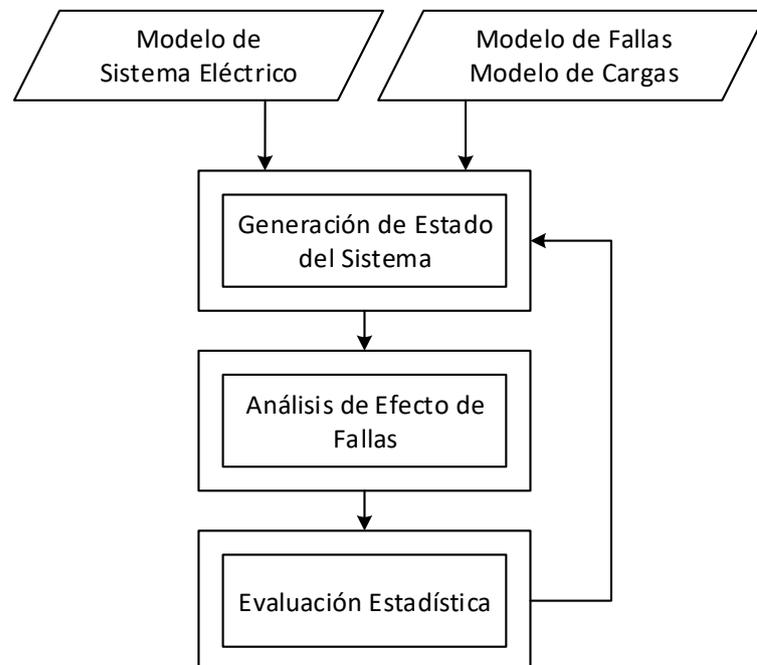


Figura 28: Diagrama de flujo del procedimiento con DigSilent Power Factory

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Los elementos principales que se toman en consideración para modelar la red de distribución radial de media tensión son:

- Tramos del alimentador aéreos y/o subterráneos, su longitud en (km).
- Subestaciones de distribución, potencia instalada, número de clientes.
- Equipos de protección.

Los tramos del alimentador se definen como conductores eléctricos separados por equipos de protección.

Dicho esto, procedemos a modelar la configuración radial simple, manteniendo los datos del ejemplo de aplicación 1.

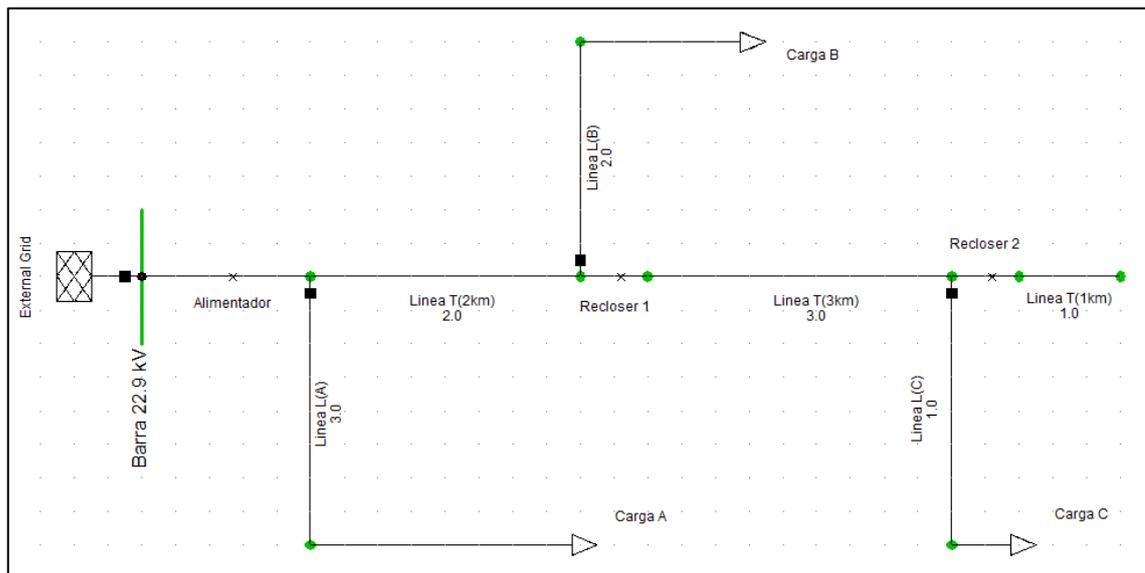


Figura 29: Configuración radial simple en DigSilent Power Factory

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Se asignó modelo de falla para cada tramo de línea y por cada componente de acuerdo a la tabla 1, haciendo uso del módulo de confiabilidad del Software DigSilent Power Factory.

Line Type Failures - Equipment Type Library\T(2km).StoTypeLine

Name: T(2km)

Sustained Failures

Failure Frequency: 1.0 1/(a*km)

Outage Expectancy: 0.5 h/(a*km)

Repair Duration: 0.5 h

Transient Failures

Transient Fault Frequency: 0.0 1/(a*km)

Figura 30: Modelo de falla para el tramo de Línea T(2km)

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Line Type Failures - Equipment Type Library\T(3km).StoTypeLine *

Name: T(3km)

Sustained Failures

Failure Frequency: 1.0 1/(a*km)

Outage Expectancy: 1.0 h/(a*km)

Repair Duration: 1.0 h

Transient Failures

Transient Fault Frequency: 0.0 1/(a*km)

Figura 31: Modelo de falla para el tramo de Línea T(3km)

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Line Type Failures - Equipment Type Library\T(1km).StoTypeLine

Basic Data

Earth Fault

Name: T(1km)

Sustained Failures

Failure Frequency: 3.0 1/(a*km)

Outage Expectancy: 6.0 h/(a*km)

Repair Duration: 2.0 h

Transient Failures

Transient Fault Frequency: 0.0 1/(a*km)

OK

Cancel

Figura 32: Modelo de falla para el tramo de Línea T(1km)

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Line Type Failures - Equipment Type Library\L(A).StoTypeLine

Basic Data

Earth Fault

Name: L(A)

Sustained Failures

Failure Frequency: 1.0 1/(a*km)

Outage Expectancy: 1.0 h/(a*km)

Repair Duration: 1.0 h

Transient Failures

Transient Fault Frequency: 0.0 1/(a*km)

OK

Cancel

Figura 33: Modelo de falla para el tramo de Línea L(A)

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Line Type Failures - Equipment Type Library\L(B).StoTypIne

Basic Data

Earth Fault

Name: L(B)

Sustained Failures

Failure Frequency: 1.5 1/(a*km)

Outage Expectancy: 3. h/(a*km)

Repair Duration: 2. h

Transient Failures

Transient Fault Frequency: 0. 1/(a*km)

OK

Cancel

Figura 34: Modelo de falla para el tramo de Línea L(B)

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Line Type Failures - Equipment Type Library\L(C).StoTypIne

Basic Data

Earth Fault

Name: L(C)

Sustained Failures

Failure Frequency: 4. 1/(a*km)

Outage Expectancy: 12. h/(a*km)

Repair Duration: 3. h

Transient Failures

Transient Fault Frequency: 0. 1/(a*km)

OK

Cancel

Figura 35: Modelo de falla para el tramo de Línea L(C)

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Ingresamos los equipos de protección en diferentes puntos de la red y los coloreamos para su mejor representación.

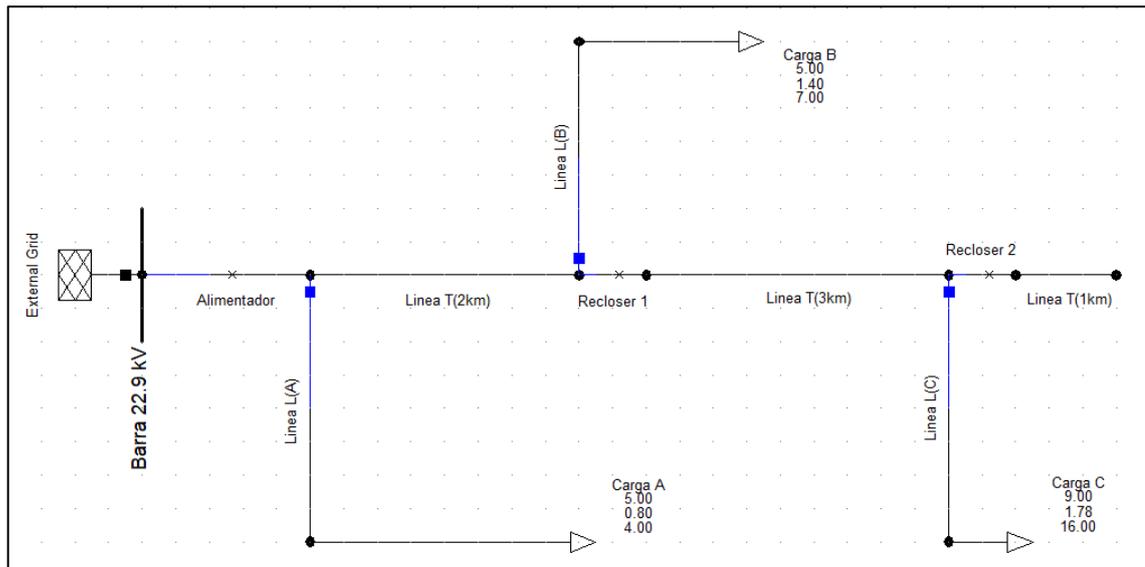


Figura 36: Ubicación de equipos de protección en la red radial simple

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Se ha comprobado que el cálculo manual de los parámetros de confiabilidad en cada punto de carga como muestra en la tabla 2, es igual que calculado con el Software DigSilent Power Factory como se muestra en la siguiente figura.

Name	Grid	Number of connected customers	LPIF 1/a	AID h	LPIT h/a
Carga A	Grid	250	5.	0.8	4.
Carga B	Grid	100	5.	1.4	7.
Carga C	Grid	50	9.	1.777778	16.

Figura 37: Cálculo de parámetros de confiabilidad en cada carga con DigSilent Power Factory

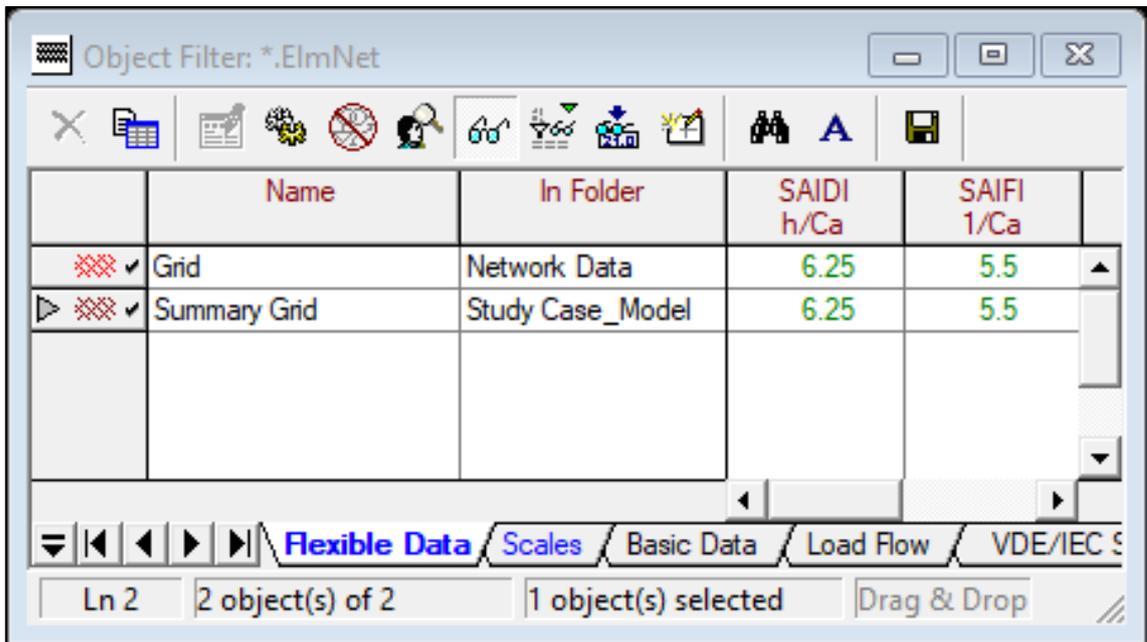
(Elaborado por el equipo de trabajo)

Donde:

- LPIF(1/a): Frecuencia de Interrupción del Punto de Carga (tasa de falla)
- AID(h): Duración Promedio de la Interrupción (tiempo de reparación)
- LPIT(h/a): Tiempo de Interrupción del Punto de Carga. (indisponibilidad)

Finalmente, ejecutamos el cálculo de confiabilidad presionando el botón

(Reliability)  en DigSilent Power Factory y se obtiene los siguientes resultados.



The screenshot shows the DigSilent Power Factory software interface. At the top, there is a window title 'Object Filter: *.ElmNet'. Below the title bar is a toolbar with various icons. The main area contains a table with the following data:

	Name	In Folder	SAIDI h/Ca	SAIFI 1/Ca
☒ ✓	Grid	Network Data	6.25	5.5
▶ ☒ ✓	Summary Grid	Study Case_Model	6.25	5.5

At the bottom of the interface, there are navigation buttons and a status bar. The status bar shows 'Ln 2', '2 object(s) of 2', '1 object(s) selected', and 'Drag & Drop'. The bottom navigation bar includes tabs for 'Flexible Data', 'Scales', 'Basic Data', 'Load Flow', and 'VDE/IEC 9'.

Figura 38: Cálculo de los índices de confiabilidad con DigSilent Power Factory

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Entonces, los índices de confiabilidad calculados con el Software DigSilent Power Factory son:

$$SAIFI = 5.50$$

$$SAIDI = 6.25$$

Ahora, compararemos los resultados de los indicadores SAIFI y SAIDI con los tres métodos de cálculo mediante una tabla como se muestra a continuación:

Tabla 4: Comparación de SAIFI y SAIDI con los tres métodos de cálculo

	SAIFI	SAIDI
Cálculo de confiabilidad		
	1/Ca	h/Ca
Registro de interrupciones	5.50	6.25
Manualmente	5.50	6.25
Software DigSilent Power Factory	5.50	6.25

(Elaborado por el equipo de trabajo)

De la tabla anterior, podemos observar y comprobar que los valores de SAIFI y SAIDI calculados mediante un “registro de interrupciones”, “manualmente” y con el “software DigSilent Power Factory” son idénticos.

Ahora, para apreciar que contingencias (n-1) ha considerado para el cálculo el software DigSilent Power Factory, podemos presionar el botón (show ) contingencies)

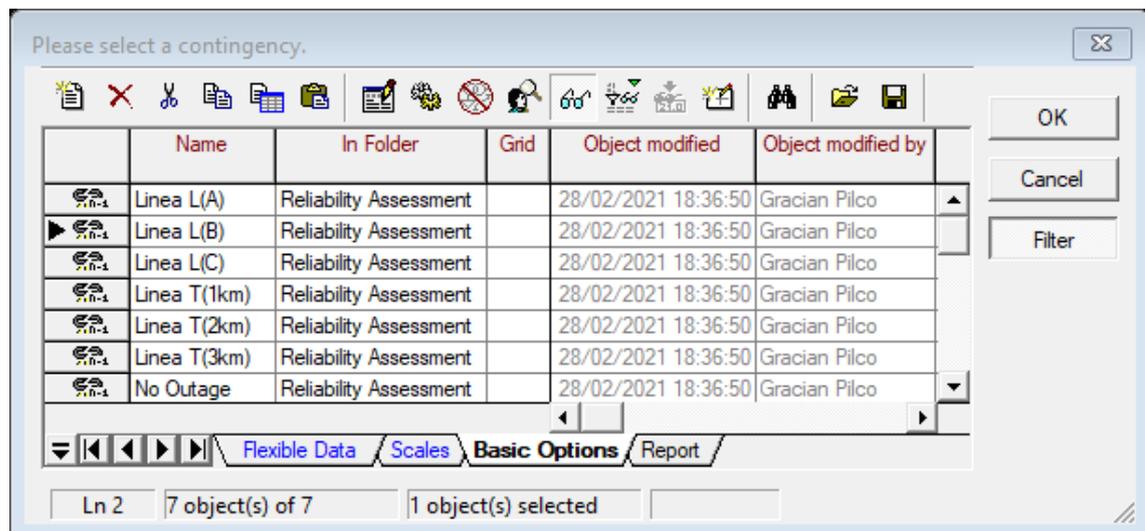


Figura 39: Contingencias de la red radial simple

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Como podemos observar en la figura anterior el software DigSilent Power Factory realiza el análisis de contingencias para cada tramo del alimentador al cual se le conoce como numeración de estados.

Como ejemplo vamos a simular una falla en el tramo troncal “Línea T(3km)”, primero ejecutamos confiabilidad presionando  el botón (Reliability), luego presionamos el botón (start trace) y nos mostrará la siguiente ventana.

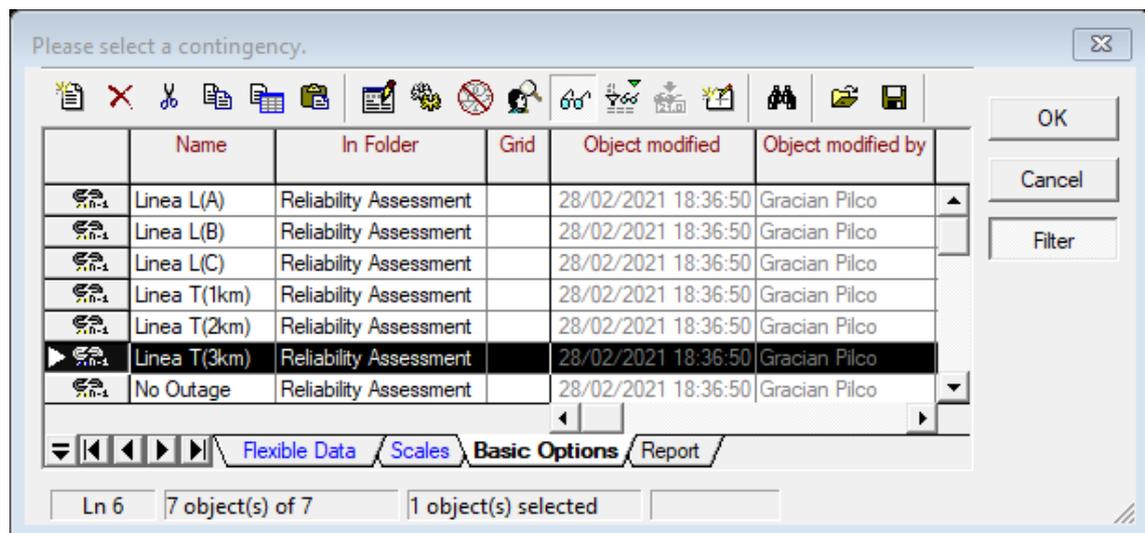


Figura 40: Análisis de contingencia para la “Línea T(3km)”

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Seguidamente damos “OK” y nos muestra la simulación de una falla en la “Línea T(3km)”.

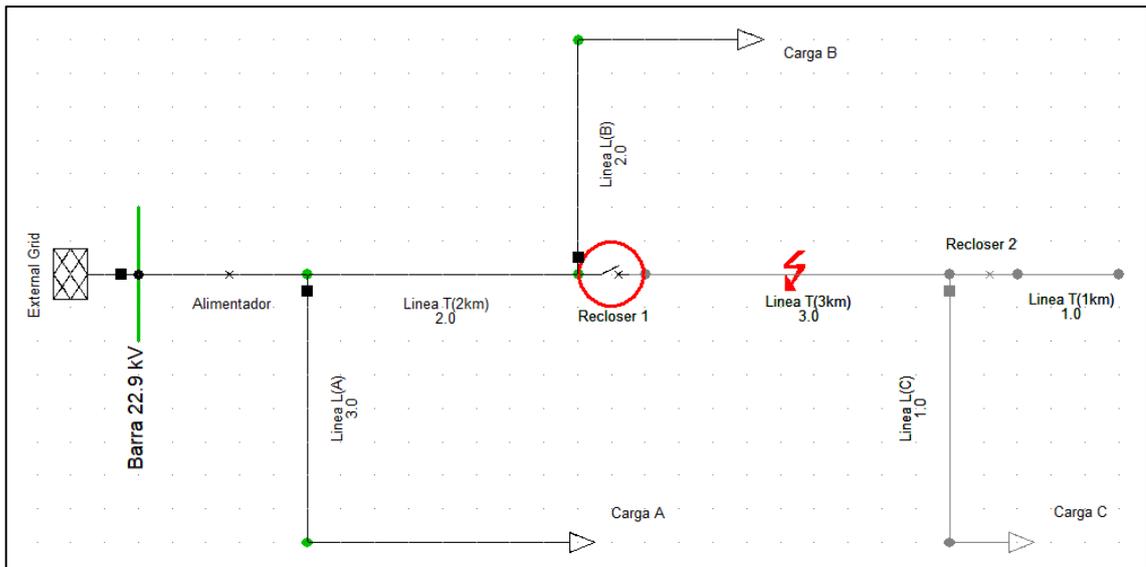


Figura 41: Simulación de falla en un tramo troncal de la red radial simple

(Elaborado por el equipo de trabajo)

De la figura anterior podemos observar que una vez ocurrido la falla en la “Línea T(3km)”, el que despeja la falla es el equipo de protección más cercano (Recloser 1).

De la misma manera podemos simular una falla en el tramo lateral “Línea L(A)” y nos muestra la siguiente figura:

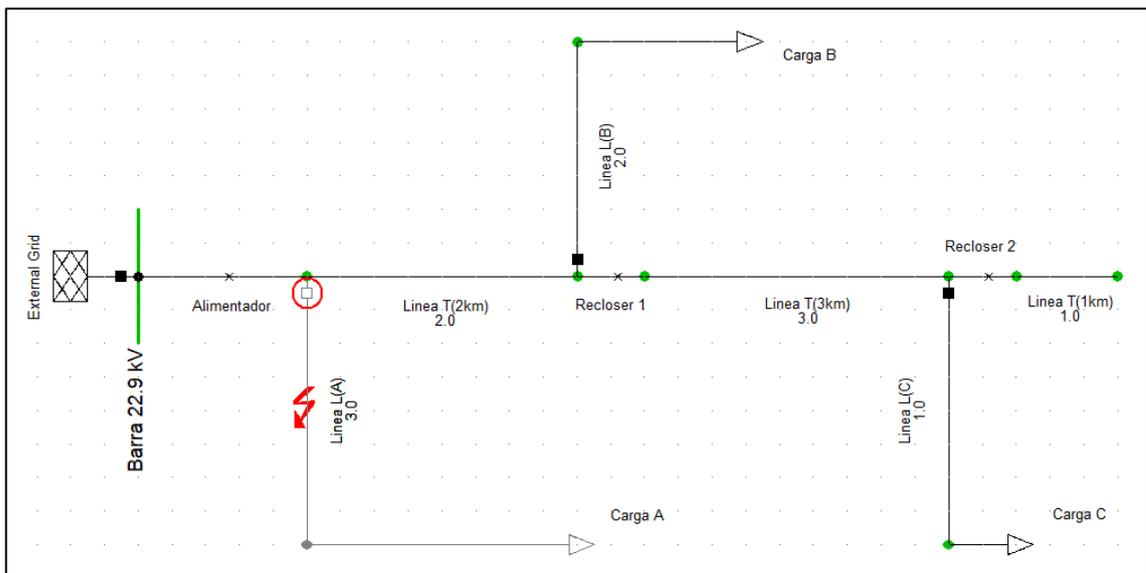


Figura 42: Simulación de falla en un tramo lateral de la red radial simple

(Elaborado por el equipo de trabajo)

De la figura anterior podemos observar que una vez ocurrido la falla en la “Línea L(A)”, el equipo de protección que despeja la falla es el seccionador fusible tipo Cut-Out.

Entonces, una falla va ser despejada donde se tenga ubicado los equipos de protección considerando que estos equipos son 100% selectivos.

2.10.3.1 Ubicación Óptima de Equipos de Protección de Forma Manual

El criterio utilizado para la ubicación de equipos de protección se desarrolla en función al mejoramiento de los indicadores de confiabilidad “SAIFI y SAIDI”.

Tomando los datos y como muestra la configuración radial de la figura 26, se determinó la ubicación óptima de equipos de protección manualmente.

La configuración radial cuenta con 5 equipos de protección (2 reclosers y 3 seccionadores fusible tipo Cut Out) a lo largo de la red y un equipo de protección en la salida del alimentador (recloser).

Para determinar las ubicaciones óptimas de equipos de protección, se procedió a eliminar los 5 equipos de protección que se tiene en el recorrido de la red de distribución, dejando únicamente el equipo de protección que se encuentra en la salida del alimentador.

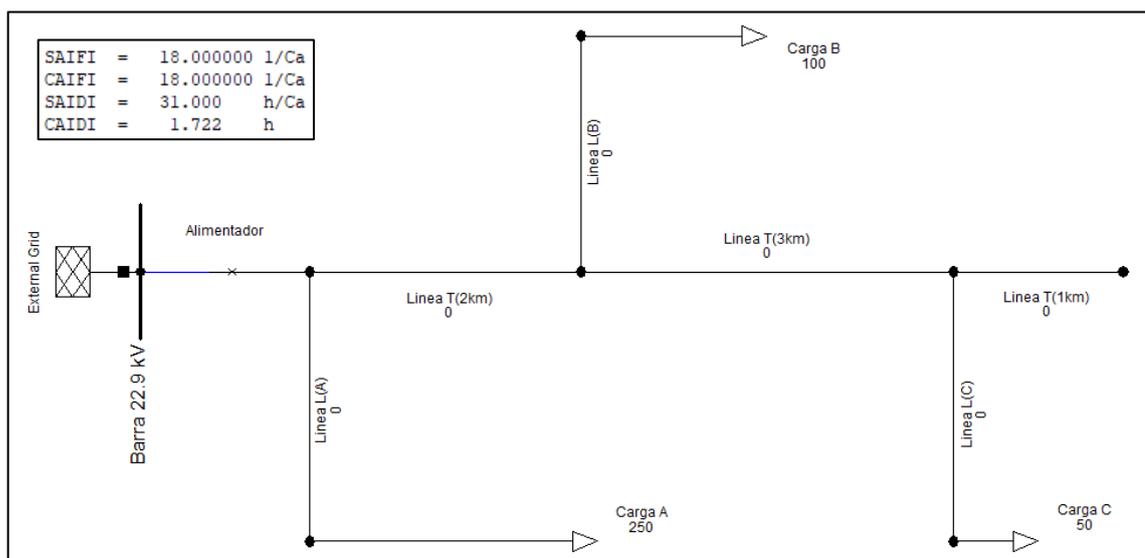


Figura 43: Configuración radial simple sin equipos de protección

(Elaborado por el equipo de trabajo)

De la figura anterior se puede observar que, sin equipos de protección se incrementó los índices de confiabilidad SAIFI 18.00 y SAIDI 31.00 respecto a los valores iniciales SAIFI 5.50 y SAIDI 6.25, el cual quiere decir que, de ocurrir una falla en cualquier tramo de la red, el equipo de protección que actúa es el que se encuentra a la salida del alimentador dejando de suministrar energía eléctrica a todo el sistema.

Para ingresar un equipo de protección, identificamos 8 posibles ubicaciones disponibles en la red, como se muestra en la siguiente figura:

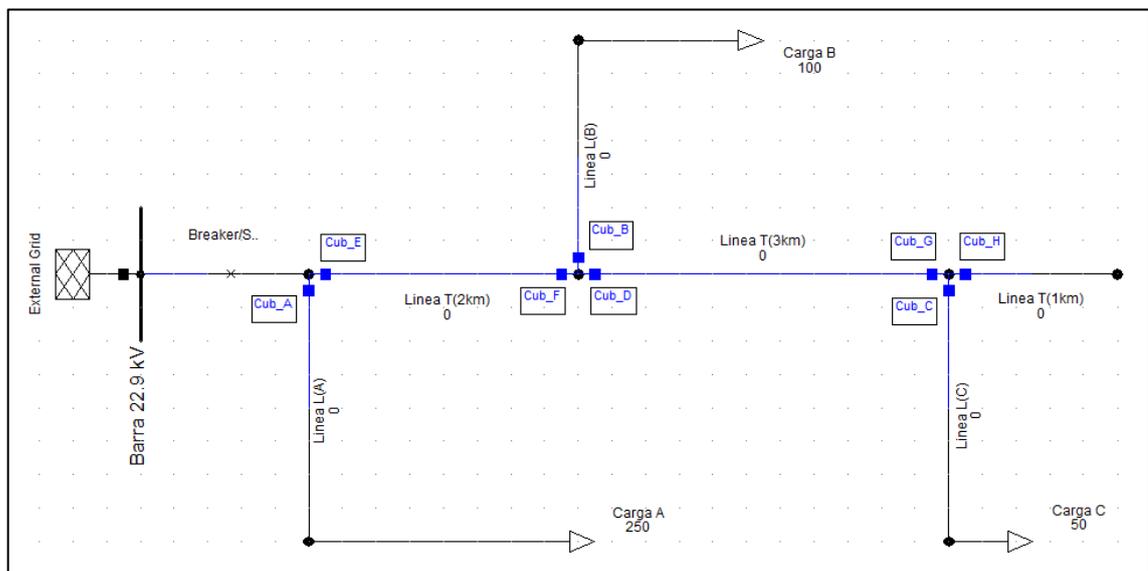


Figura 44: Configuración radial simple – ubicaciones disponibles

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Ingresado el primer equipo de protección a la red, ejecutamos confiabilidad presionando el botón (Reliability)  en cada ubicación disponible, luego de un proceso iterativo identificamos el menor valor de SAIFI y SAIDI, el cual será nuestra primera ubicación óptima.

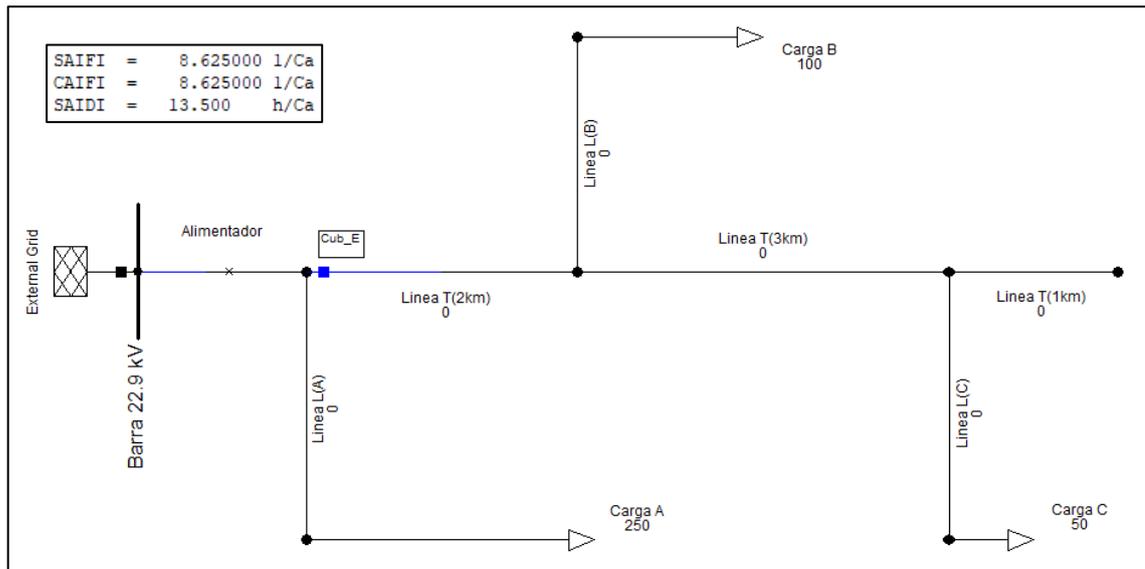


Figura 45: Configuración radial simple – primera ubicación óptima

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En la figura anterior podemos observar que nuestra primera ubicación óptima es en el cubículo E (Cub_E), teniendo como resultado SAIFI 8.625 y SAIDI 13.500.

Una vez identificado la primera ubicación óptima, manteniendo el primer equipo ingresamos el siguiente equipo de protección y de la misma manera del caso inicial realizamos el cálculo de confiabilidad e identificamos la ubicación óptima. Del mismo modo se realiza para los siguientes equipos de protección.

En la tabla siguiente podemos apreciar los resultados del cálculo de confiabilidad en cada ubicación disponible de la red (8 ubicaciones disponibles) y por cada equipo de protección (5 equipos de protección).

Tabla 5: Resumen del cálculo de confiabilidad por cada ubicación disponible

Nº de Equipos	Índices	Cub A	Cub B	Cub C	Cub D	Cub E	Cub F	Cub G	Cub H
1	SAIFI	16.875	15.750	14.500	9.250	8.625	9.875	11.875	15.000
	SAIDI	29.875	26.500	20.500	12.625	13.500	14.125	15.250	25.000
2	SAIFI	7.500	8.250	7.625	6.125	-	8.625	6.875	7.500
	SAIDI	12.375	12.750	10.500	8.250	-	13.500	9.000	11.250
3	SAIFI	5.000	5.750	6.125	-	-	6.125	6.125	5.750
	SAIDI	7.125	7.500	8.250	-	-	8.250	8.250	7.500

(Continuación...)

4	SAIFI	-	4.625	5.000	-	-	5.000	5.000	4.625
	SAIDI	-	6.375	7.125	-	-	7.125	7.125	6.375
5	SAIFI	-	-	4.625	-	-	4.625	4.625	4.250
	SAIDI	-	-	6.375	-	-	6.375	6.375	5.625

(Elaborado por el equipo de trabajo)

De acuerdo a la tabla 5, los equipos de protección deben ser ubicados óptimamente como se muestra en la siguiente figura.

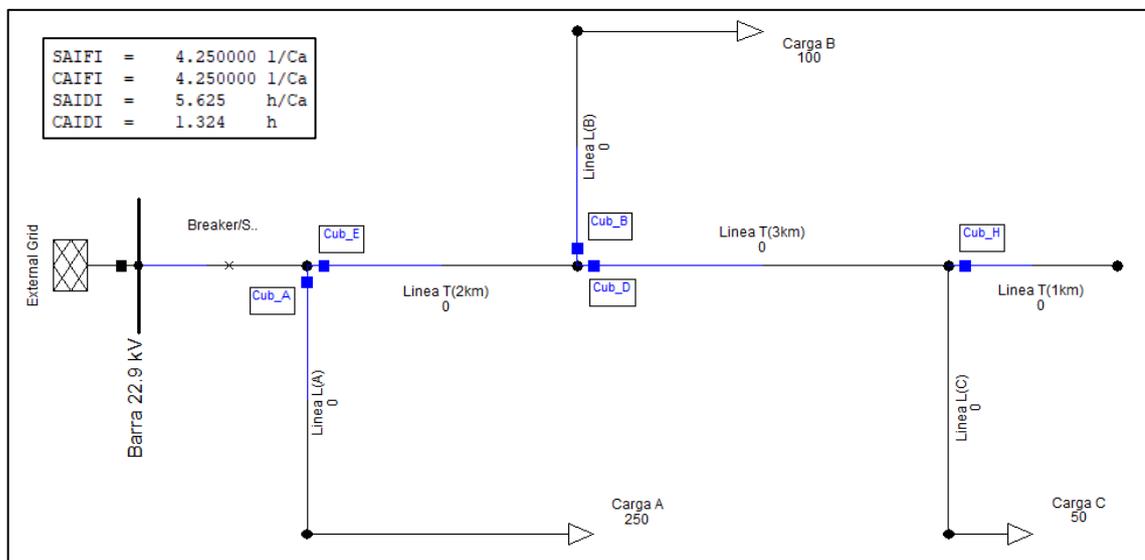


Figura 46: Configuración radial simple – con ubicación óptima

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Con 05 equipos de protección ubicados inicialmente, como muestra en la figura 26, se tenía SAIFI 5.50 y SIDI 6.25, luego de realizar el cálculo de la ubicación óptima de equipos de protección, en la tabla 5 podemos apreciar que tan solo ubicando óptimamente 03 equipos de protección se tiene resultados similares al caso inicial SAIFI 5.00 y SAIDI 7.125, e ingresando los 05 equipos de protección, se logra mejorar los índices de confiabilidad SAIFI 4.250 y SAIDI 5.625.



Como ya sabemos, la ubicación óptima de equipos de protección se determina, donde haya mayor reducción del SAIFI y SAIDI, esto lo podemos realizar manualmente moviendo un equipo de protección en cada nodo que representa una estructura, pero para redes extensas demandaría mucho tiempo realizar dicho proceso. Por esa razón en el presente trabajo de investigación se ha implementado una nueva propuesta de optimización para mejorar los índices de confiabilidad mediante un algoritmo en DPL del Software DigSilent Power Factory, el cual nos facilita el cálculo más rápido y eficaz para todo el sistema eléctrico Yarada.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según *Baena (2017)*, indica que la investigación aplicada, por su parte, concentra su atención en las posibilidades concretas de llevar a la práctica las teorías generales, y destina sus esfuerzos a resolver los problemas que se plantea la sociedad. Por tal motivo el presente trabajo de investigación es del tipo aplicada, porque a partir del diagnóstico actual del sistema eléctrico se pretende resolver el problema de la confiabilidad del sistema eléctrico Yarada.

3.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Según los investigadores *Hernández, Fernández & Baptista (2014)*, en su libro denominado “Metodología de la Investigación”, indican que los estudios explicativos van más allá de la descripción de conceptos y del establecimiento de relaciones entre conceptos; es decir, están dirigidos a responder por las causas de los eventos. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables. Por esa razón la investigación reúne las características de un nivel de investigación explicativo para el presente proyecto de tesis, debido a que se establece una relación de causa efecto, entre las variables independientes que es la ubicación óptima de equipos de protección en el sistema eléctrico Yarada, con la variable dependiente que son los indicadores SAIFI y SAIDI, con ello se plantea resolver el problema de la confiabilidad utilizando el software de simulación de sistemas de potencia denominado DIgSILENT Power Factory.

3.3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Según los investigadores *Morán & Alvarado (2010)*, en su libro denominado “Métodos de Investigación”, indican que el método analítico es un proceso que sirve para conocer, que consiste en descomponer un objeto de estudio mediante la separación de

cada una de las partes del todo para estudiarlas en forma individual. Por esa razón se utilizó el método analítico, porque separamos todos los componentes del sistema eléctrico Yarada y lo analizamos cada uno de ellos.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1 Población y muestra

En el presente trabajo de investigación la población a beneficiarse en forma directa serán todos los trabajadores, empleados y funcionarios de la empresa ElectroSur S.A. e indirectamente a todos los usuarios del Sistema Eléctrico Yarada, puesto que se mejorará la continuidad del suministro eléctrico por parte de la concesionaria ElectroSur S.A. - Tacna.

Tabla 6: Demanda máxima y cantidad de usuarios.

Subestación	Alimentador	Nivel de tensión (kV)	Máxima demanda (MW)	Nº de usuarios
S.E. YARADA	O-161	10	2.295	368
	O-162	10	3.720	486
	O-163	10	1.810	265
	O-164	10	0.710	2543
	O-165	10	0.960	446

(Elaborado por el equipo de trabajo)

La muestra son todos los alimentadores en 10kV; O-161, O-162, O-163, O-164 y O-165 del Sistema Eléctrico Yarada de la concesionaria ElectroSur S.A. - Tacna.

3.5 UBICACIÓN

A continuación, se muestra los datos generales de la ubicación y descripción climatológica del área en estudio.

Tabla 7: Ubicación y descripción

UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN	
Departamento	Tacna
Provincia	Tacna
Distrito	La Yarada – Los Palos
Centro Poblado	La Yarada
Localización	18°12'20"S / 70°32'21"O

(Continuación...)

Altitud	62 m.s.n.m.
Temperatura media	24.6°C
Humedad	69%

FUENTE: Senamhi, 2019

3.6 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

Para lograr con cada uno de los objetivos específicos, es necesario obtener los datos con la información necesaria para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Tabla 8: *Técnicas e instrumentos para recolección de datos*

Variable	Técnica	Instrumento
Sistema Eléctrico Yarada	Revisión documentaria Uso del Software de simulación	Software DigSilent Power Factory
Método de cálculo	Revisión documentaria Uso del Software de simulación	Software DigSilent Power Factory
Índices de Confiabilidad	Revisión documentaria Uso del Software de simulación	Software DigSilent Power Factory
Criterio para ubicación óptima de equipos de protección	Revisión documentaria Uso del Software de simulación	Software DigSilent Power Factory

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Para realizar un correcto estudio de confiabilidad; Electrosur S.A., mediante el Centro de Control de Operaciones, brindó la información principal para el desarrollo del presente trabajo de investigación, los cuales son:

- Base de datos de los alimentadores del sistema eléctrico Yarada (documento. pfd).
- Base de datos del reporte de interrupciones del año 2019, en base al Anexo 1 y 2 del procedimiento OSINERGMIN Nro. 074-2004-OS/CD.
- Planos y Diagramas unifilares.



- Acceso a la utilización del software DIgSILENT Power Factory.

Además, para complementar y dar desarrollo al presente trabajo de investigación, se recurrió a: Investigaciones, revistas, artículos, tesis y capacitaciones referidos al mejoramiento de la confiabilidad mediante la ubicación óptima de equipos de protección.

3.7 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para el procesamiento y análisis de datos, se realizó uso de diferentes softwares informáticos según sea el caso:

Tabla 9: *Técnicas de procesamiento y análisis de datos*

Procesamiento de datos	Técnica	Instrumento
Diagnóstico de la confiabilidad en base al procedimiento 074.	Uso del software y base de datos Reporte de interrupciones	Software Microsoft Excel 2016
Cálculo de los parámetros de confiabilidad para tramos de alimentador (líneas)	Uso del software y base de datos Reporte de interrupciones	Software Microsoft Excel 2016
Modelamiento de la red	Uso del software y base de datos GIS	Software DigSilent Power Factory
Cálculo de ubicación óptima de equipos de protección y uso de DPL.	Uso del software de simulación y cálculo	Software DigSilent Power Factory
Interpretación de los resultados obtenidos	Análisis de resultados	Base de datos y resultados

(Elaborado por el equipo de trabajo)

3.8 ÁMBITO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN

El ámbito de estudio es desarrollado en el Sistema Eléctrico de distribución Yarada, de la concesionaria de distribución ElectroSur S.A., el cual se ubica en el distrito Yarada del departamento de Tacna.

Mediante software DigSilent Power Factory se evalúa la confiabilidad de los alimentadores del sistema eléctrico Yarada, mediante los índices SAIFI y SAIDI.

Se emplea estrategias para mejorar los índices de confiabilidad mediante la reubicación de equipos de protección.

Se decide por la mejor ubicación de equipos para el valor menor de SAIFI y SAIDI.

En la figura siguiente se muestra el esquema que abarca las actividades de la investigación sobre la confiabilidad de los alimentadores del sistema eléctrico Yarada.

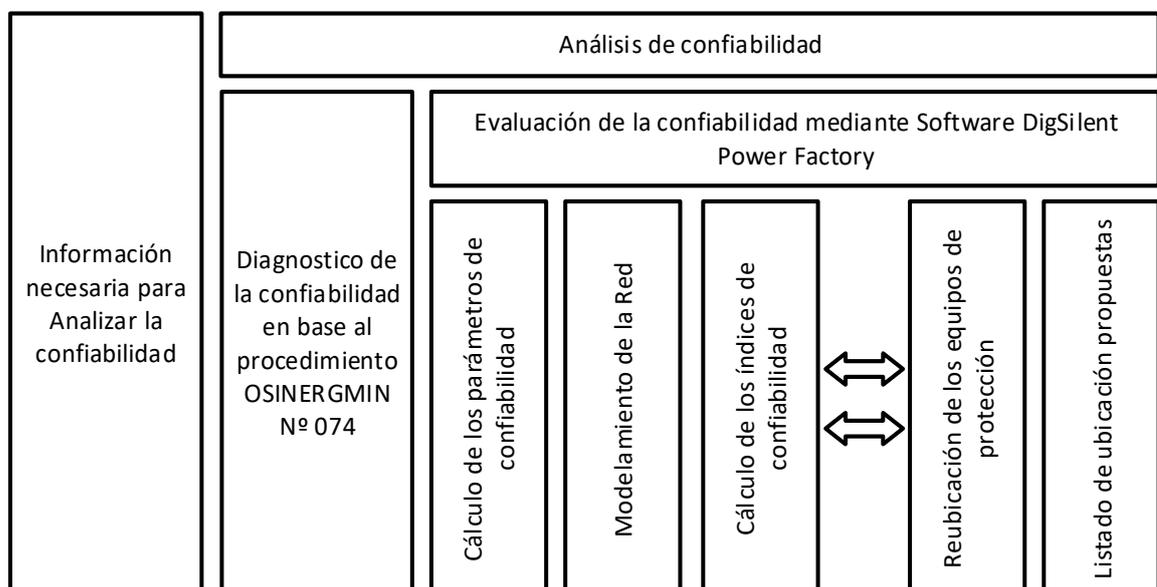


Figura 48:Diagrama general para el estudio de Confiabilidad

(Elaborado por el equipo de trabajo)

3.9.1 Información necesaria para evaluar la confiabilidad

- Reporte de interrupciones imprevistas (fallas) incluyendo casos de fuerza mayor en el Anexo 01 del GFE del procedimiento Osinergmin N° 074-OS/CD.
- Base de datos del GIS donde indique las ubicaciones de los componentes del sistema eléctrico Yarada.



- Datos de número de clientes por subestación de distribución y longitud de los tramos de la línea.

Para realizar el presente estudio de investigación se ha tomado el reporte histórico de interrupciones de Electrosur S.A. del periodo anual (enero – diciembre 2019), que está registrado en base al procedimiento aprobado con resolución Osinergmin N° 074-OS/CD.

3.9.2 Determinación de cálculos de los parámetros de confiabilidad mediante un registro de interrupciones

Para la evaluación de la confiabilidad se utilizó el siguiente método de cálculo:

- Del reporte histórico de interrupciones, que está en base al procedimiento Osinergmin N° 074-OS/CD, se ha identificado los dispositivos de protección que han operado (Instalación que salió) en el periodo anual (enero – diciembre 2019).
- Se ha realizado la sectorización de las redes de distribución como muestra la siguiente figura, entendiéndose que un sector tiene como frontera los equipos de protección que operaron en el periodo anual (enero – diciembre 2019) y los inicios de cada sector lo determina el campo (Instalación que salió) indicado en el registrado histórico de interrupciones.

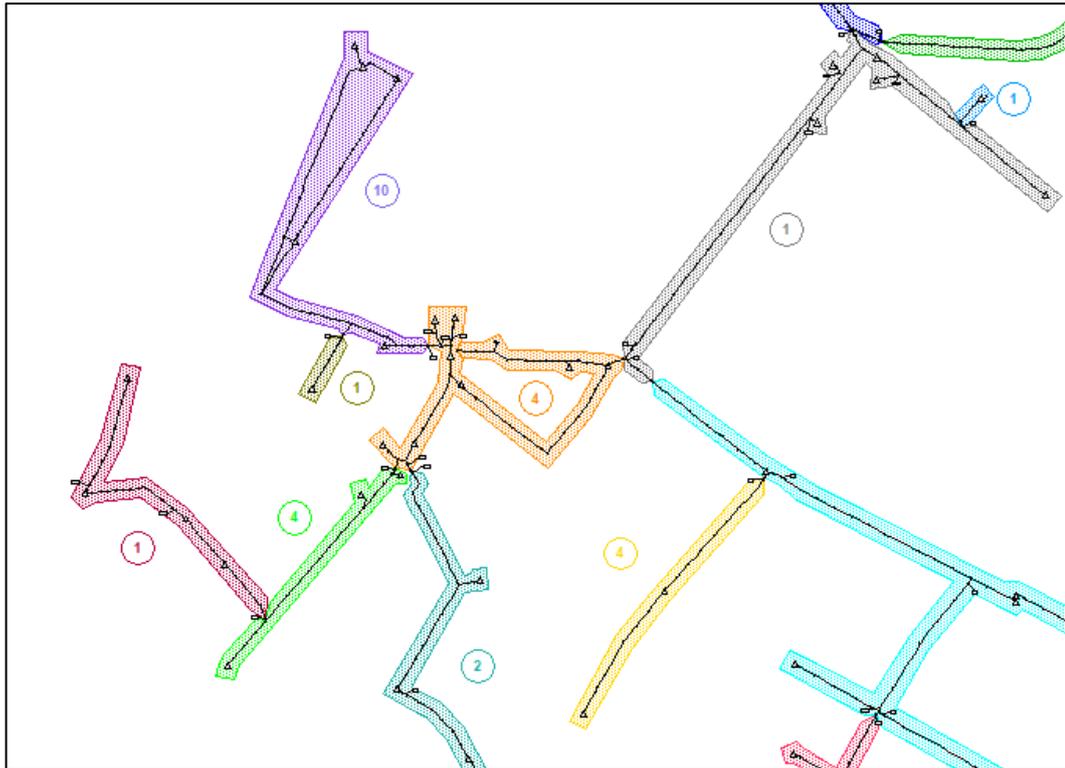


Figura 49: Sectorización de redes de distribución.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En el ANEXO E: ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD – SECTORIZACIÓN, podemos observar la sectorización de las redes de media tensión por cada alimentador, en donde:

- La tasa de falla para los tramos de línea de la red se ha calculado por sector, y es el resultado de dividir el número de fallas entre la longitud total de la red.
- El tiempo de reparación para los tramos de línea de la red se ha calculado por sector, y es el promedio de duración de las interrupciones del sector que esta expresada en horas (h).

En resumen, para el cálculo de los parámetros de confiabilidad como son: Tasa de falla y tiempo de reparación, se ha calculado en base a la siguiente tabla:

Tabla 10: Resumen de cálculo de parámetros de confiabilidad

ALM	EQP	Código Interrupción	Tiempo de reparación	Long. Red (km)	Tasa de fallas (λ)	Tiempo de reposición (r)
		E010	T010			
		E011	T011			
		E012	T012			
	EQP1	.	.	km1	$\lambda1=x/km1$	$r1=(T010+T011+T012+\dots+T01x/x$
		.	.			
		.	.			
		E01x	T01x			
		E030	T030			
		E031	T031			
		E032	T032			
	EQP2	.	.	km2	$\lambda2=y/km2$	$r2=(T030+T031+T032+\dots+T03y/y$
		.	.			
		.	.			
		E03y	T03y			
		E050	T050			
		E051	T051			
		E052	T052			
ALM1	EQP3	.	.	km3	$\lambda3=z/km2$	$r3=(T050+T051+T052+\dots+T05z/z$
		.	.			
		.	.			
		E05z	T05z			
		.	.			
		.	.			
		.	.			
		.	.			
		.	.			
		E0n1	T0n1			
		E0n2	T0n2			
		E0n3	T0n3			
	EQPn	.	.	Kmn	$\lambda n=n/kmn$	$r n=(T0n1+T0n2+T0n3+\dots+T0nn/n$
		.	.			
		.	.			
		E0nn	T0nn			

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Donde:

- ALM1: Alimentador principal ALM1.



- EQP1, EQP2, EQP3, ..., EQPn : Equipo y/o sector de la red.
- E010, E011, E012, ..., E01x: "n" de eventos o fallas ocurridos en el sector E010.
- T010, T011, T012, ..., T01x: Tiempos de reparación de los "n" eventos en el sector E010.
- km1, km2, km3, ..., kmn: Kilómetros de la línea que corresponde a cada sector.
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$: Tasa de fallas que corresponde a cada sector.
- r1, r2, r3, ..., rn: Tiempo de reposición que corresponde a cada sector.

Los resultados del cálculo de los parámetros de confiabilidad se muestran en la tabla 14.

3.9.3 Determinación de los índices de confiabilidad

Siguiendo el mismo procedimiento del ejemplo de aplicación 01, se procedió a realizar los cálculos de los índices de confiabilidad correspondientes para el sistema eléctrico Yarada.

Una vez modelado los componentes del sistema eléctrico Yarada en el Software DigSilent Power Factory, de la tabla 14 se procedió ingresar el primer modelo de falla (λ , r) para el punto de seccionamiento o sector "O-161", como se muestra en la siguiente figura.

Section	Parameter	Value	Unit
Sustained Failures	Name	O-161	
	Failure Frequency	1.408	1/(a*km)
	Outage Expectancy	2.623104	h/(a*km)
	Repair Duration	1.863	h
Transient Failures	Transient Fault Frequency	0.	1/(a*km)

Figura 50: Modelo de falla para punto de seccionamiento O-161

(Elaborado por el equipo de trabajo)

De la misma manera como muestra la figura anterior, se procede a introducir el resto de modelos de fallas al Software DigSilent Power Factory por cada punto de seccionamiento o sector.

Después se ejecutó el comando de confiabilidad (Reliability) , donde nos muestra el resultado de los índices de confiabilidad SAIFI y SADI en la figura 56.

3.9.4 Determinación de la ubicación óptima de equipos de protección

Sabiendo que las redes del sistema eléctrico Yarada son extensas, demandaría mucho tiempo determinar las ubicaciones óptimas de los equipos de protección de manera manual. Por esa razón en el presente trabajo de investigación se ha implementado una nueva propuesta de optimización para mejorar los índices de confiabilidad mediante un algoritmo en DPL del Software DigSilent Power Factory, el cual nos facilita el cálculo más rápido y eficaz para todo el sistema eléctrico Yarada.

Para llevar a cabo la ubicación óptima de los equipos de protección se utilizó el algoritmo iterativo que evalúa a partir de un grupo de ubicaciones disponibles los cuales deben definirse dándonos como resultado la mejora de los índices de confiabilidad.

```
DPL Command - Eval_Confiabilidad.ComDpl *
Basic Options
Advanced Options
Script
Description
Version

Program text
!DPL PARA LA UBICACION OPTIMA DE EQUIPOS DE PROTECCION - S.E YARADA;

!DECLARACION DE VARIABLES;
set sLin, sCub;
int eq, iCount, iCub;
object oLin, oCub, oCUB, Ldf, Conf, minBus, minLin;
object GraA, GraB, GraC, ViPagA, ViPagB, ViPagC, PlotA, PlotB, PlotC;
double y, x, yf, xd, minENS, minSAIFI, minSAIDI, varF, cr, cs, cc;
int i;
string cubic, teq;

!LIMPIEZA DE VENTANA DE SALIDA;
EchoOff();
ClearOutput();

!EJECUAR FLUJO Y CONFIABILIDAD!
Ldf=GetCaseObject('ComLdf');
Conf=GetCaseObject('ComRel3');
if(Ldf=NULL){
  Error('No existe comando de flujo de carga');
  exit();
}
i=Ldf.Execute();
if(i){
  Error('Error en el cálculo de flujo de carga');
  exit();
}
i=Conf.Execute();
```

Figura 51: Lenguaje de programación DPL para la ubicación óptima de equipos de protección.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Para una mejor interpretación del procedimiento del algoritmo para la ubicación óptima de equipos de protección, mostramos el siguiente diagrama de flujo.

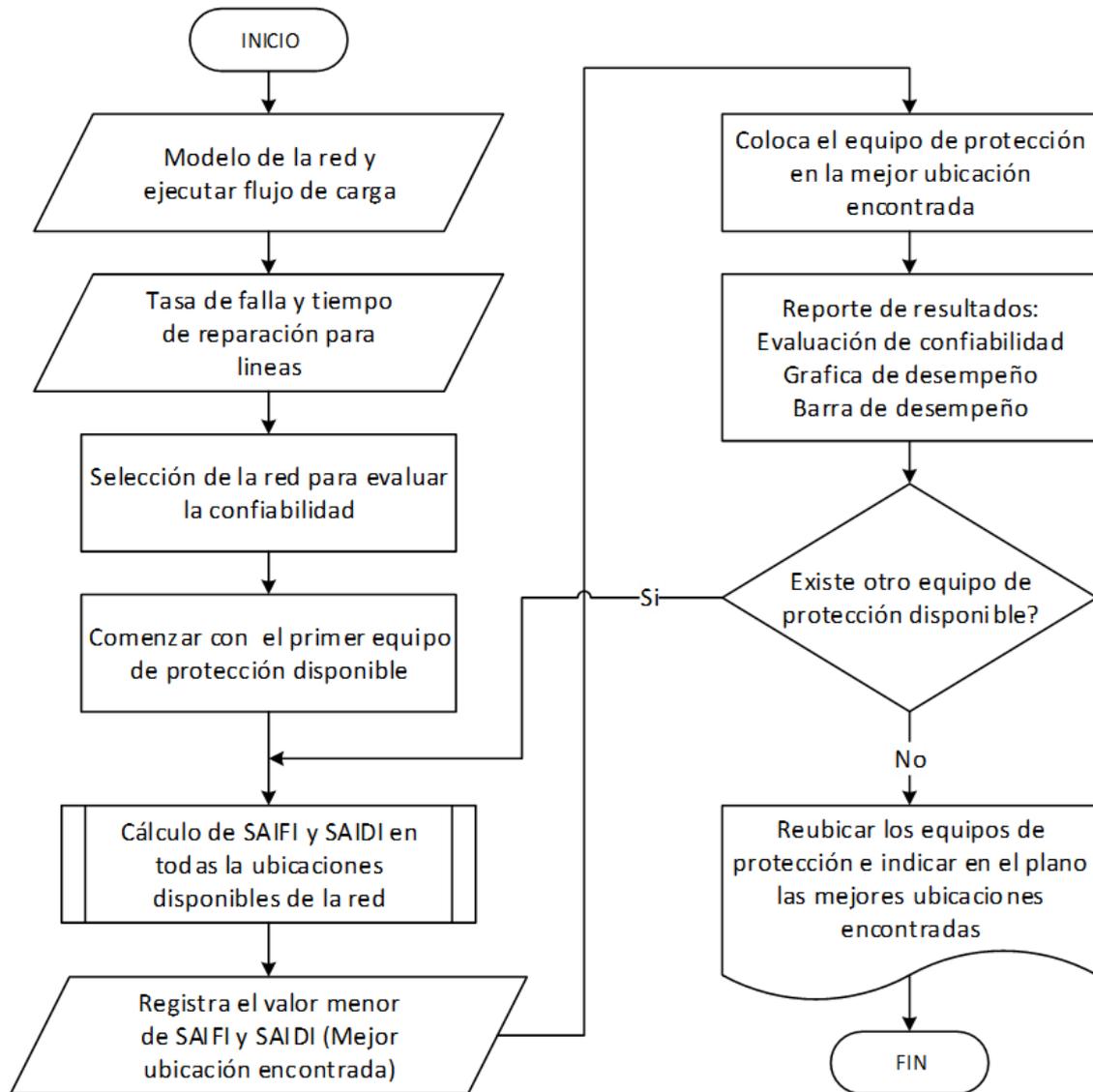


Figura 52: Algoritmo para la ubicación óptima de equipos de protección.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Se debe entender que este procedimiento es para ubicar óptimamente los equipos de protección como también equipos de seccionamiento, este último se refiere a los seccionadores Cut Out el cual debe ser definido en el estudio de coordinación de protección como equipo de “protección” o “seccionamiento”.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DIAGNÓSTICO DE LA CONFIABILIDAD

Se realizó en base al procedimiento Osinergmin N° 074-OS/CD.

4.1.1 Índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada del periodo 2016 al 2019

Los resultados de los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada en el periodo 2016 al 2019, es como se detalla a continuación:

Tabla 11: Resultados de los indicadores SAIFI y SAIDI por año

Año	Sistema Eléctrico	Sector Típico	Numero Clientes	Indicadores ElectroSur S.A		Tolerancia Osinergmin	
				SAIFI	SAIDI	SAIFI	SAIDI
2019			4108	28.568	62.558		
2018	YARADA	3	3862	29.911	74.588	7.00	12.00
2017	(SE0113)		3479	21.938	39.210		
2016			2940	22.373	50.355		

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Podemos apreciar que en estos últimos años los valores del SAIFI y SAIDI del sistema eléctrico Yarada superan las tolerancias exigidas por Osinergmin.

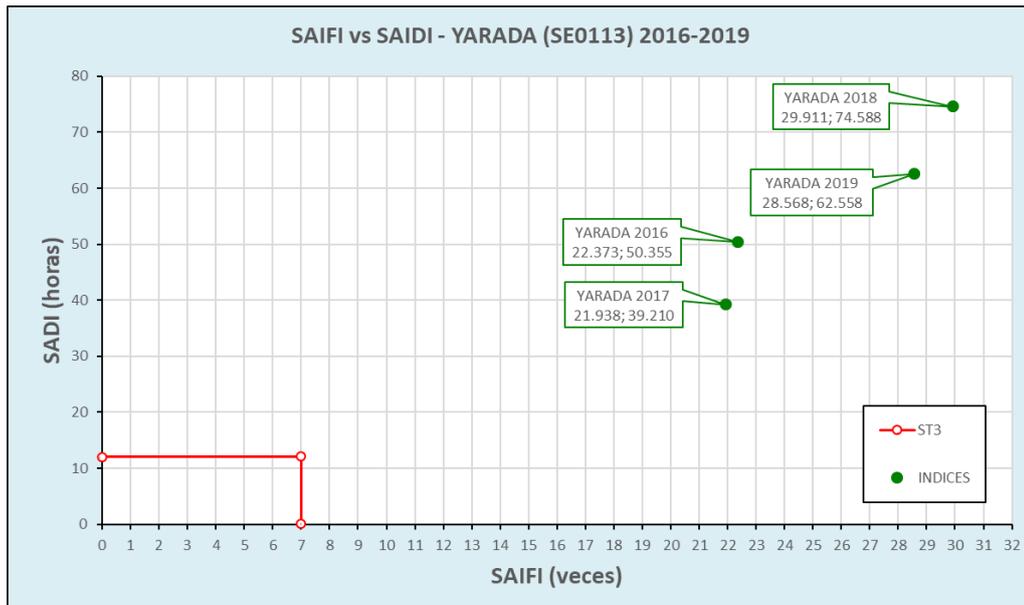


Figura 53: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada 2016-2019

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En la gráfica podemos apreciar que los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada en los años 2016, 2017, 2018 y 2019 se encuentran fuera de la zona objetiva, el cual es considerado como sistema eléctrico crítico por Osinergmin.

4.1.2 Índices de confiabilidad mediante el registro de interrupciones - 2019

En base al reporte de interrupciones en el periodo anual (enero – diciembre 2019), se ha realizado el cálculo de SAIFI y SAIDI para los 5 alimentadores y por sistema eléctrico, teniendo como resultado lo siguiente:

Tabla 12: Resultados de los indicadores SAIFI y SAIDI por alimentador

Año	Sistema Eléctrico	Alimentador	Sector Típico	Numero Clientes	Indicadores ELS - Inicial	
					SAIFI	SAIDI
2019	YARADA (SE0113)	O-161	3	368	24.066	44.076
		O-162	3	486	24.525	65.632
		O-163	3	265	22.615	56.977
		O-164	3	2543	32.453	67.254
		O-165	3	446	18.137	51.083
		SELEC	3	4108	28.568	62.558

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Como se sabe que la tolerancia para el sector típico 3 es, SAIFI 7.00 y SAIDI 12.00, podemos apreciar que ninguno de los alimentadores está dentro de la tolerancia exigida.

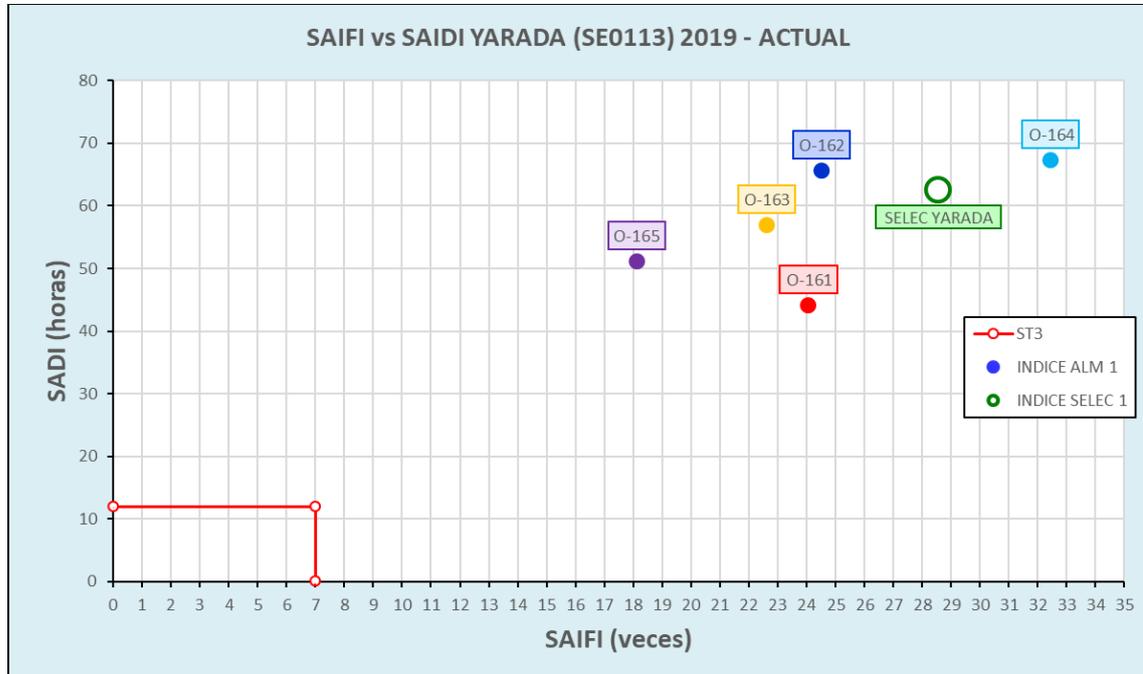


Figura 54: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada 2019
(Elaborado por el equipo de trabajo)

Los resultados mostrados en la figura anterior, es considerando todas las causas de interrupciones según el procedimiento Osinergmin N° 074-OS/CD.

La Resolución N° 010-2004-OS/CD “Directiva para la Evaluación de las Solicitudes de Calificación de Fuerza Mayor para Instalaciones de Transmisión y Distribución”, indica que las interrupciones del servicio eléctrico que corresponde a un caso imprevisible, irresistible, extraordinario y además externa a las instalaciones del concesionario, corresponde a un caso de fuerza mayor. Entonces, considerando que las interrupciones por fuerza mayor sean aceptadas por Osinergmin, podemos despreocupar las siguientes causas de interrupciones, Actos vandálicos, Fenómenos naturales, Hurto de

conductores y/o equipos eléctricos, Impacto de vehículo contra estructura, entre otros.

Quedando así el resultado final de los índices de confiabilidad sin fuerza mayor.

Tabla 13: Resultados de los indicadores SAIFI y SAIDI sin fuerza mayor

Año	Sistema Eléctrico	ALM	Sector Típico	Numero Clientes	Indicadores ELS - inicial		Indicadores ELS - sin fuerza mayor	
					SAIFI	SAIDI	SAIFI	SAIDI
2019	YARADA (SE0113)	O-161	3	368	24.066	44.076	13.927	34.817
		O-162	3	486	24.525	65.632	19.453	56.563
		O-163	3	265	22.615	56.977	12.521	42.083
		O-164	3	2543	32.453	67.254	22.234	53.631
		O-165	3	446	18.137	51.083	10.944	35.633
		SELEC	3	4108	28.568	62.558	19.308	49.593

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Graficando los resultados de la tabla anterior, se apreciaría como lo mostrado en la siguiente figura.

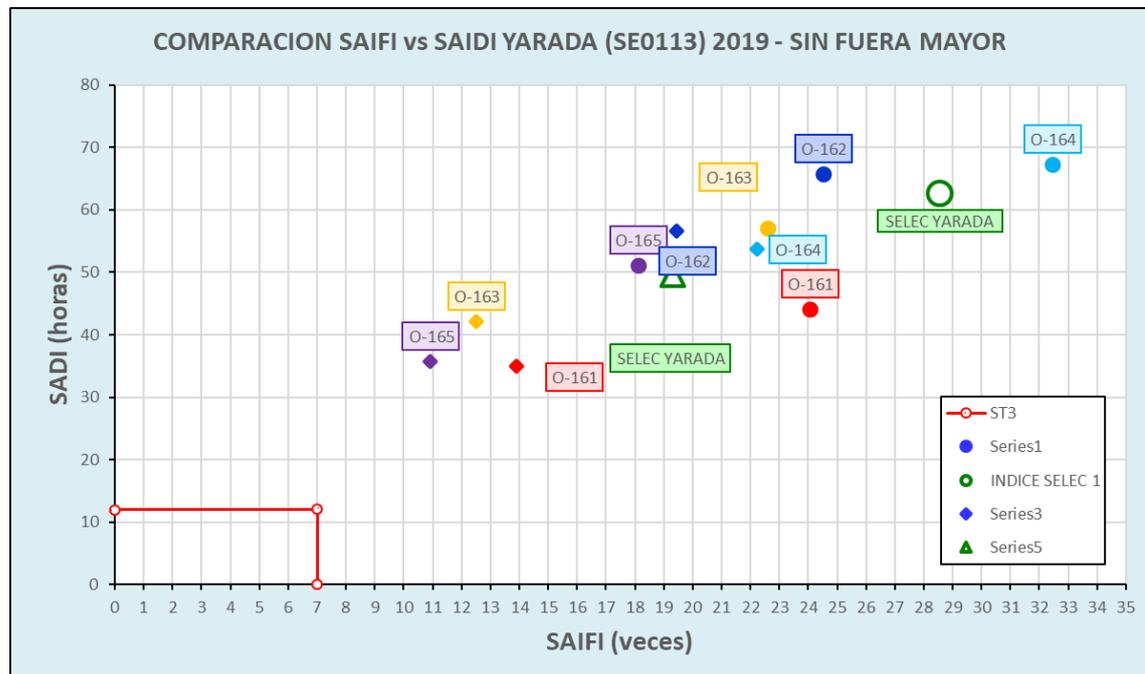


Figura 55: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada 2019 sin fuerza mayor.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

4.2 PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD

Los parámetros de confiabilidad para cada alimentador, se ha determinado en base al reporte de interrupciones en el periodo anual (enero – diciembre 2019) correspondientes a los alimentadores del sistema eléctrico Yarada de la empresa Electrosur S.A., éste se detalla en el ANEXO C: “REPORTE DE INTERRUPCIONES – ELECTROSUR S.A. 2019, que está en base al procedimiento Osinergmin N° 074-OS/CD.

En la siguiente tabla se muestra los resultados del cálculo de los parámetros de confiabilidad por cada punto de seccionamiento.

Tabla 14: Resultados del cálculo de los parámetros de confiabilidad

ALM	Punto de Sección	Numero de fallas	Número de clientes	km red/sector	λ (fallas/km/año)	r (h)
O-161	O-161	23	368	16.34	1.408	1.863
O-161	PS055	1	90	4.51	0.222	1.167
O-161	PSA030	1	251	6.24	0.160	1.000
O-162	SS080	1	66	0.34	2.941	2.983
O-162	SS007E	1	1	4.07	0.246	1.000
O-162	O-162	18	486	34.39	0.523	2.679
O-162	SR003	4	48	28.65	0.140	4.533
O-162	SR004	4	253	3.58	1.117	1.696
O-162	SR005	2	45	12.18	0.164	3.875
O-162	SS014	1	309	3.76	0.266	3.967
O-162	SS017	2	1	0.25	8.000	1.317
O-162	SS018	2	4	1.62	1.235	1.800
O-162	SS021	4	94	1.52	2.632	3.029
O-162	SS024E	1	4	1.97	0.508	3.267
O-162	SS150	1	28	14.2	0.070	2.483
O-162	SS270	4	5	1.97	2.030	5.683
O-162	SSA01	10	98	4.31	2.320	2.287
O-162	SSA02	2	38	2.32	0.862	6.350
O-163	NR003	11	109	0.47	23.404	3.344
O-163	NS006	2	26	3.04	0.658	1.608
O-163	NS060	2	85	20.93	0.096	0.658
O-163	NSA02	1	24	4.53	0.221	0.300
O-163	NSA03	1	9	5.26	0.190	4.267
O-163	NSA04	1	20	4.16	0.240	0.450
O-163	O-163	17	265	20.81	0.817	2.399
O-164	KR007	23	2171	27.66	0.832	1.490
O-164	KS137	1	148	0.55	1.818	4.000
O-164	KS140	1	260	0.37	2.703	1.000

(Continuación...)

O-164	KS145	2	627	5.04	0.397	1.450
O-164	KS182	7	60	0.96	7.292	1.207
O-164	NS210	1	5	0.92	1.087	1.183
O-164	NS250	1	16	1.41	0.709	10.967
O-164	O-164	12	2543	22.99	0.522	3.058
O-165	O-165	15	446	6.89	2.177	2.867
O-165	QS005	5	289	26.72	0.187	2.583

(Elaborado por el equipo de trabajo)

4.3 INDICES DE CONFIABILIDAD MEDIANTE EL SOFTWARE DIGSILENT POWER FACTORY

En la siguiente figura se aprecia el resultado del cálculo de los índices de confiabilidad inicial por cada alimentador y sistema eléctrico Yarada mediante el software DigSilent Power Factory.

Name	In Folder	SAIFI 1/Ca	SAIDI h/Ca
O-161	Network Data	24.06618	44.07621
O-162	Network Data	24.5249	65.63152
O-163	Network Data	22.61504	56.97726
O-164	Network Data	32.45346	67.25409
O-165	Network Data	18.13733	51.08299
Summary Grid	MaxDem_2019 (Prote	28.56762	62.55807

Figura 56: Resultados de los índices SIFI y SAIDI calculados mediante el Software DigSilent Power Factory – Inicial

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Como se puede observar en la siguiente tabla, los índices de confiabilidad calculados según reporte de interrupciones y calculados con software DigSilent Power Factory, son similares con un error mínimo, esto debido a los decimales que no fueron considerados para el cálculo.

Tabla 15: Resultados de los índices SAIFI y SAIDI inicial – reporte de interrupciones vs Software DigSilent Power Factory

Año	Sistema Eléctrico	Alimentador	Índices calculados según reporte de interrupciones		Índices calculados Software DigSilent Power Factory	
			SAIFI	SAIDI	SAIFI	SAIDI
2019	YARADA (SE0113)	O-161	23.927	43.817	24.066	44.076
		O-162	24.510	65.572	24.525	65.632
		O-163	22.562	56.857	22.615	56.977
		O-164	32.462	67.275	32.453	67.254
		O-165	18.240	51.370	18.137	51.083
		SELEC	28.574	62.573	28.568	62.558

(Elaborado por el equipo de trabajo)

4.4 UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN

Utilizando la herramienta lenguaje de programación DPL del Software DigSilent Power Factory, se ha realizado la búsqueda de las ubicaciones óptimas de los equipos de protección para cada alimentador del sistema eléctrico Yarada.

Tabla 16: Resultado de las ubicaciones óptimas de los equipos de protección por alimentador.

ITEM	ALM	Código Equipo	Ubicación inicial	Ubicación final	Tipo de Equipo	Situación
1	O-161	PSA005	Cub_0793	Cub_0793	Seccionalizador	Permanece
2		PSA030	Cub_1046	Cub_0884	Seccionalizador	Reubicado
3		PS008E	Cub_0979	Cub_1092	Seccionador Cut Out	Reubicado
4		PS020	Cub_0818	Cub_0970	Seccionador Cut Out	Reubicado
5		PS005E	Cub_1041	Cub_1041	Seccionador Cut Out	Permanece
1	O-162	SR002	Cub_0849	Cub_0849	Recloser	Permanece
2		SR004	Cub_0844	Cub_1132	Recloser	Reubicado
3		SR003	Cub_1125	Cub_1125	Recloser	Permanece
4		SR005	Cub_1980	Cub_1980	Recloser	Permanece
5		SSA01	Cub_1228	Cub_0905	Seccionalizador	Reubicado
6		SS021	Cub_1777	Cub_1062	Seccionador Cut Out	Reubicado

(Continuación...)

7		SS130	Cub_1464	Cub_0900	Seccionador Cut Out	Reubicado
8		SS005E	Cub_1092	Cub_1092	Seccionador Cut Out	Permanece
9		SS017	Cub_1948	Cub_1841	Seccionador Cut Out	Reubicado
10		SS013E	Cub_1037	Cub_848	Seccionador Cut Out	Reubicado
11		SS019	Cub_1211	Cub_1196	Seccionador Cut Out	Reubicado
12		SS050E	Cub_875	Cub_1000	Seccionador Cut Out	Reubicado
1		NR003	Cub_0751	Cub_1238	Recloser	Reubicado
2		NR002	Cub_1433	Cub_1255	Recloser	Reubicado
3		NSA01	Cub_1480	Cub_0925	Seccionalizador	Permanece
4		NS006	Cub_0866	Cub_0866	Seccionador Cut Out	Permanece
5		NS013	Cub_0876	Cub_0912	Seccionador Cut Out	Reubicado
6	O-163	NSA02	Cub_0754	Cub_0754	Seccionalizador	Permanece
7		NS005E	Cub_1349	Cub_0746	Seccionador Cut Out	Reubicado
8		NS020	Cub_1367	Cub_1367	Seccionador Cut Out	Permanece
9		NS007	Cub_1036	Cub_1036	Seccionador Cut Out	Permanece
10		NS060	Cub_1377	Cub_1377	Seccionador Cut Out	Permanece
11		NS015E	Cub_0767	Cub_0925	Seccionador Cut Out	Reubicado
1		NR005	Cub_0745	Cub_1216	Recloser	Reubicado
2	O-164	KS190	Cub_1235	Cub_0869	Seccionador Cut Out	Reubicado
3		KS200	Cub_1447	Cub_1447	Seccionador Cut Out	Permanece
1		QS010	Cub_0969	Cub_0969	Seccionador Cut Out	Permanece
2		QS160	Cub_0865	Cub_0790	Seccionador Cut Out	Reubicado
3	O-165	QS015	Cub_1165	Cub_0742	Seccionador Cut Out	Reubicado
4		QS200	Cub_0877	Cub_1015	Seccionador Cut Out	Reubicado
5		QS005	Cub_1049	Cub_0949	Seccionador Cut Out	Reubicado

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En el ANEXO F: EVALUACIÓN DE CONFIABILIDAD – UBICACIÓN ÓPTIMA DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN CON DPL, podemos observar las ubicaciones óptimas de los equipos de protección.

En las siguientes figuras se muestra el resultado del proceso iterativo con el algoritmo DPL del software DigSilent Power Factory, donde cada punto representa la ubicación disponible de la red, luego captura el resultado más favorable del SAIFI y SAIDI, para finalmente volver a realizar el mismo proceso de acuerdo a la cantidad de equipos de protección existentes en cada alimentador del sistema eléctrico Yarada.

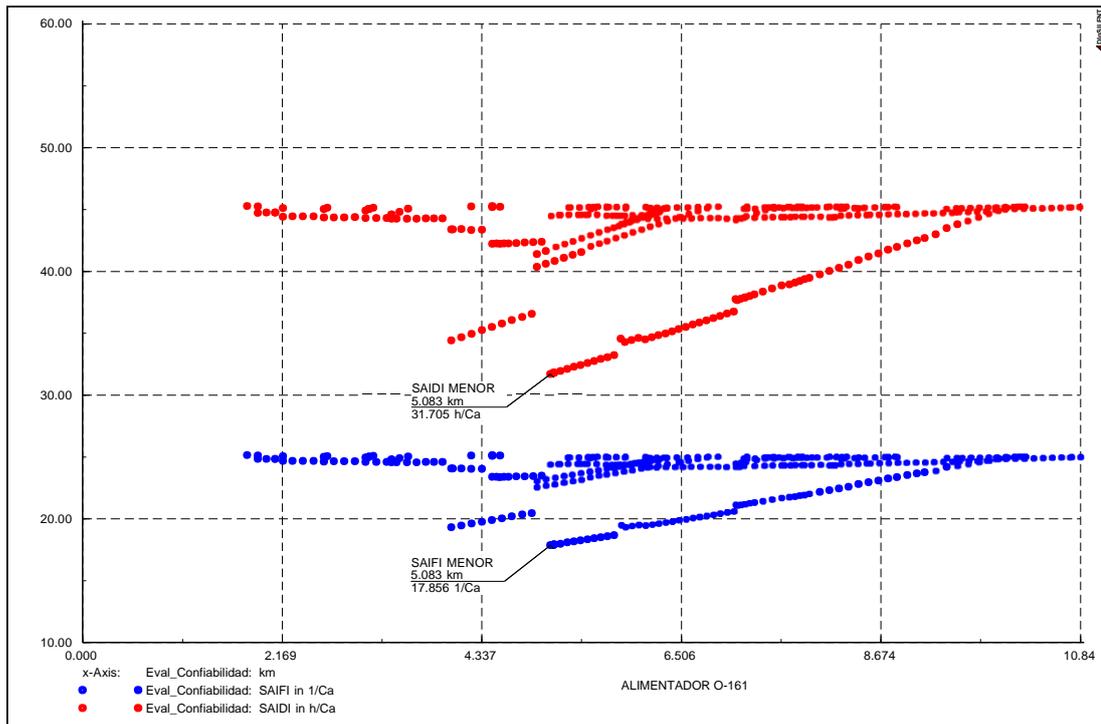


Figura 57: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-161

(Elaborado por el equipo de trabajo)

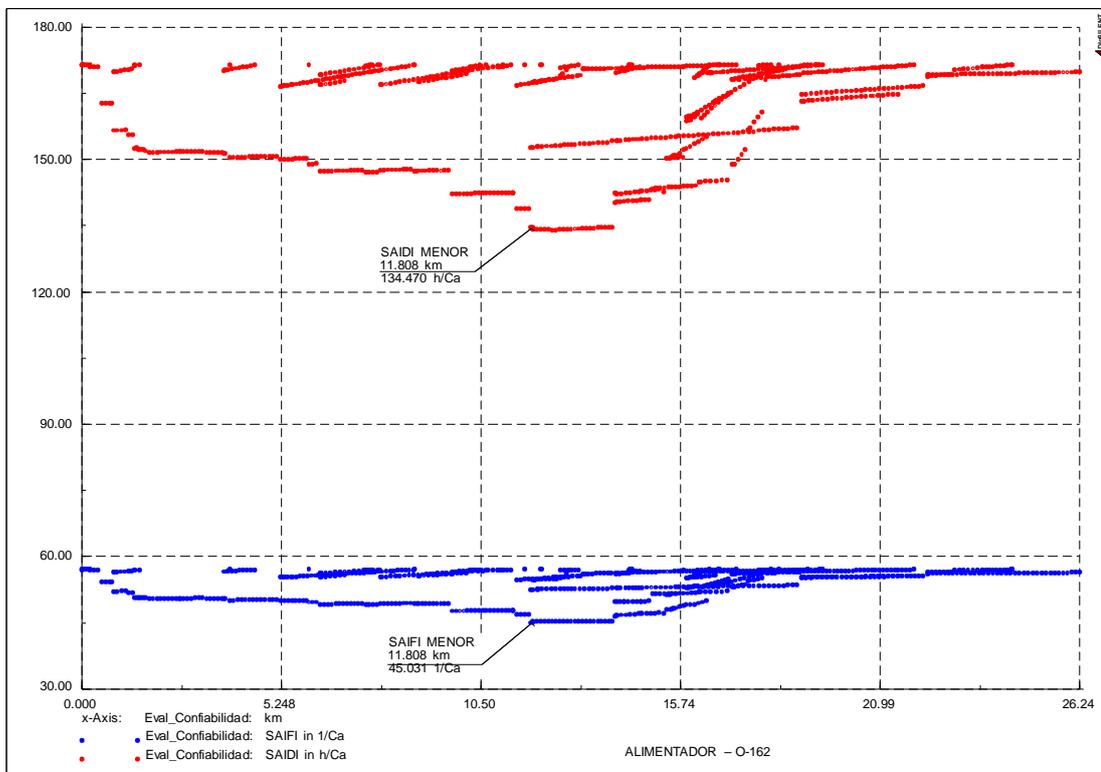


Figura 58: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-162.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

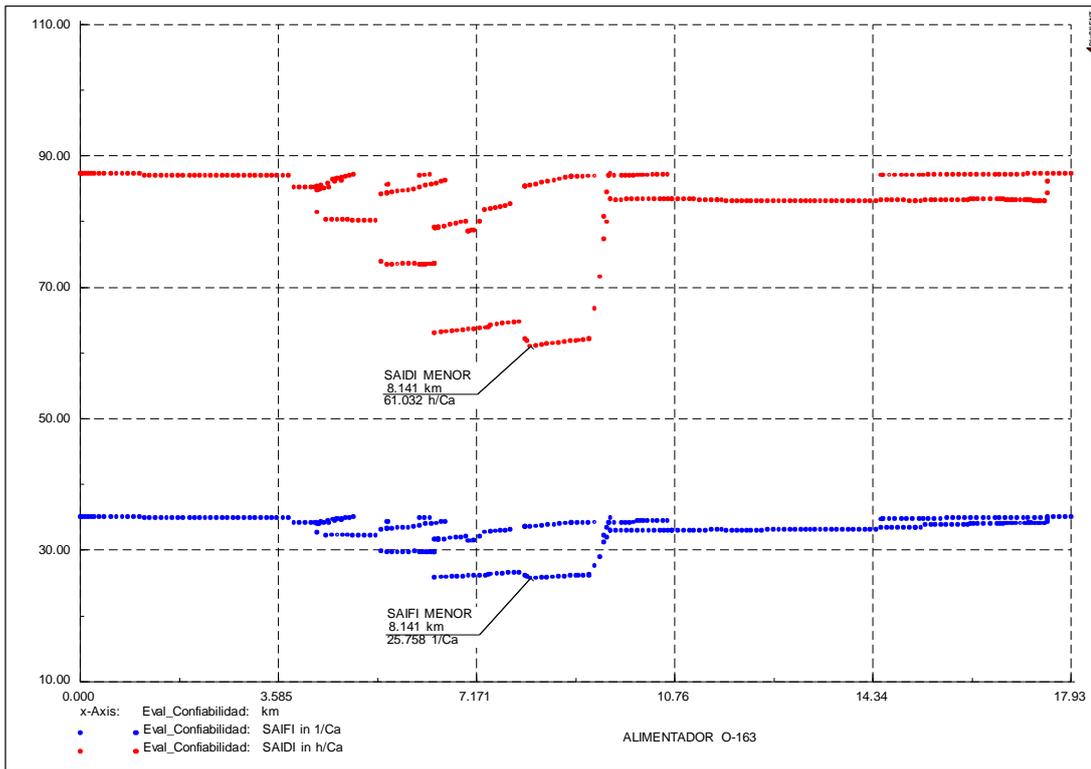


Figura 59: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-163

(Elaborado por el equipo de trabajo)

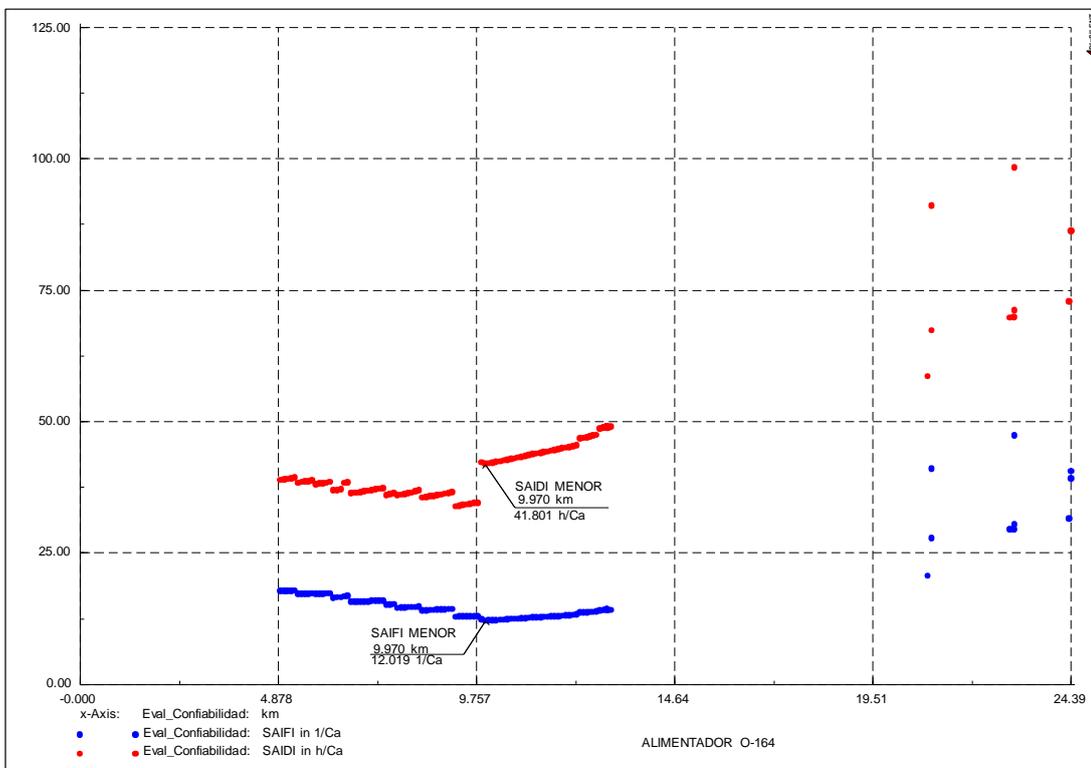


Figura 60: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-164.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

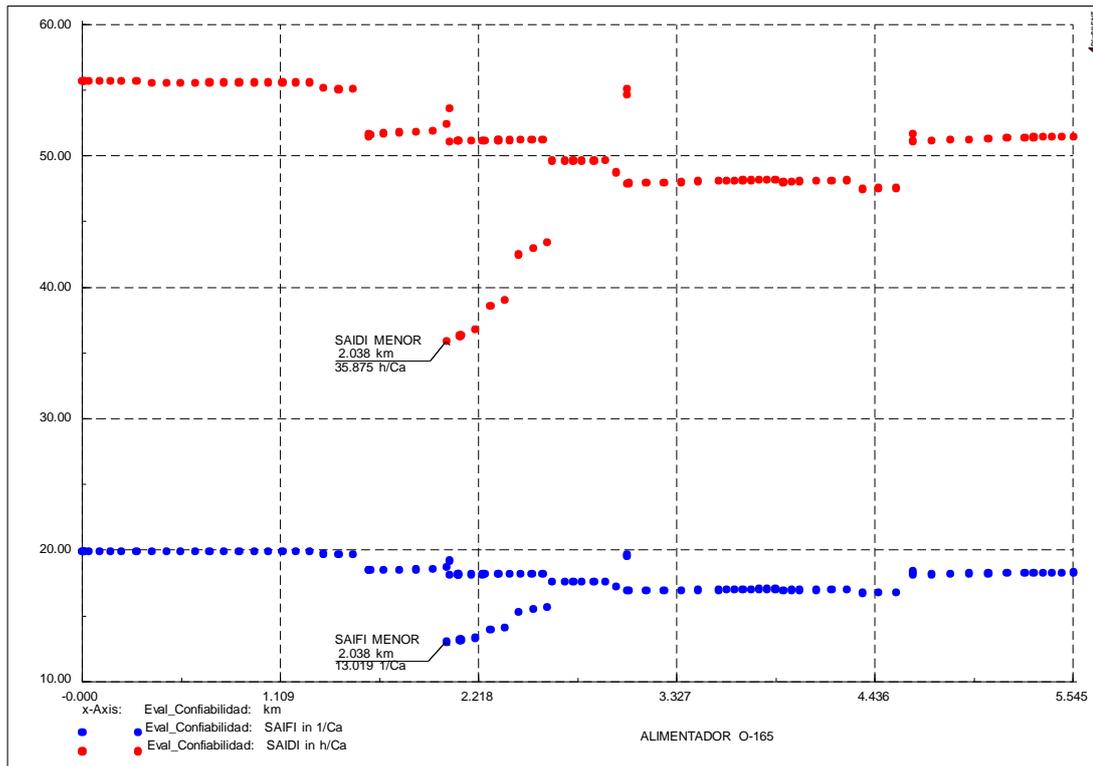


Figura 61: Evaluación de la confiabilidad - Alimentador O-165

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En la gráfica de desempeño - alimentador O-161, se muestra la evolución de los índices de confiabilidad a medida que se implementa los equipos de protección, se aprecia que los dos primeros equipos de protección mejoran significativamente los índices de confiabilidad, sin embargo, a partir del tercer equipo de protección se aprecia que la mejora de confiabilidad ya no es sustancial. Con esto podemos afirmar que necesariamente se debe de priorizar la reubicación de dos equipos de protección para mejorar los índices de confiabilidad. También se puede observar que aún no se logra llegar a la zona objetiva de acuerdo a las tolerancias establecidas por Osinergmin.

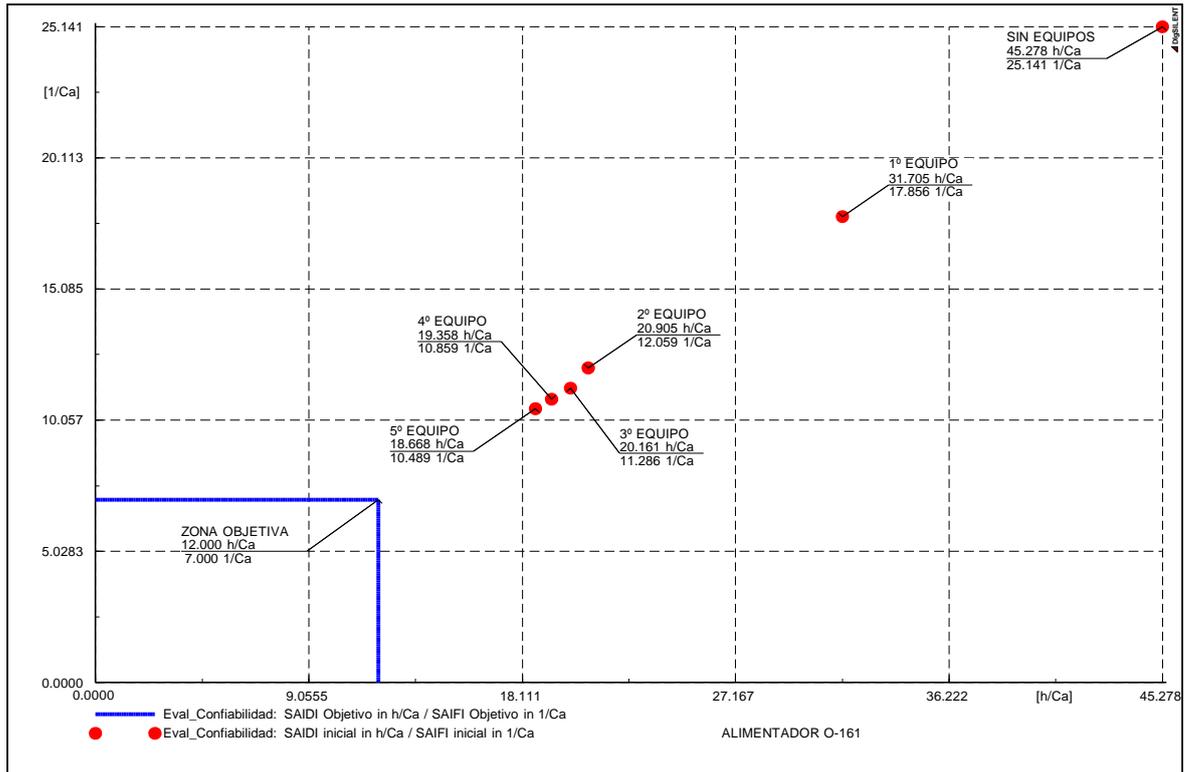


Figura 62: Gráfica de desempeño - Alimentador O-161.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En la gráfica de desempeño - alimentador O-162, se muestra la evolución de los índices de confiabilidad a medida que se implementa los equipos de protección, se aprecia que los cinco primeros equipos de protección mejoran significativamente los índices de confiabilidad, sin embargo, a partir del sexto equipo de protección se aprecia que la mejora de confiabilidad ya no es sustancial. Con esto podemos afirmar que necesariamente se debe de priorizar la reubicación de cinco equipos de protección para mejorar los índices de confiabilidad. También se puede observar que aún no se logra llegar a la zona objetivo de acuerdo a las tolerancias establecidas por Osinergmin.

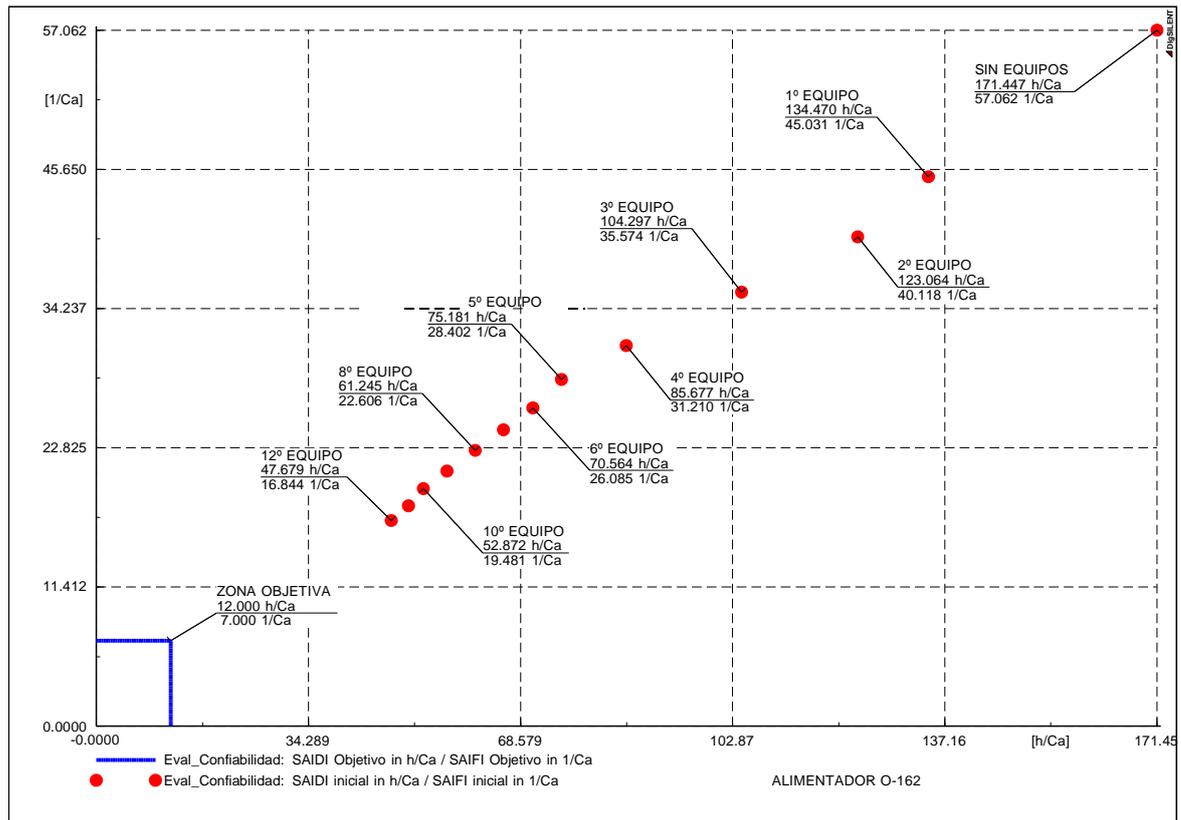


Figura 63: Gráfica de desempeño - Alimentador O-162.

En la gráfica de desempeño - alimentador O-163, se muestra la evolución de los índices de confiabilidad a medida que se implementa los equipos de protección, se aprecia que los seis primeros equipos de protección mejoran significativamente los índices de confiabilidad, sin embargo, a partir del séptimo equipo de protección se aprecia que la mejora de confiabilidad ya no es sustancial. Con esto podemos afirmar que necesariamente se debe de priorizar la reubicación de seis equipos de protección para mejorar los índices de confiabilidad. También se puede observar que aún no se logra llegar a la zona objetiva de acuerdo a las tolerancias establecidas por Osinergmin.

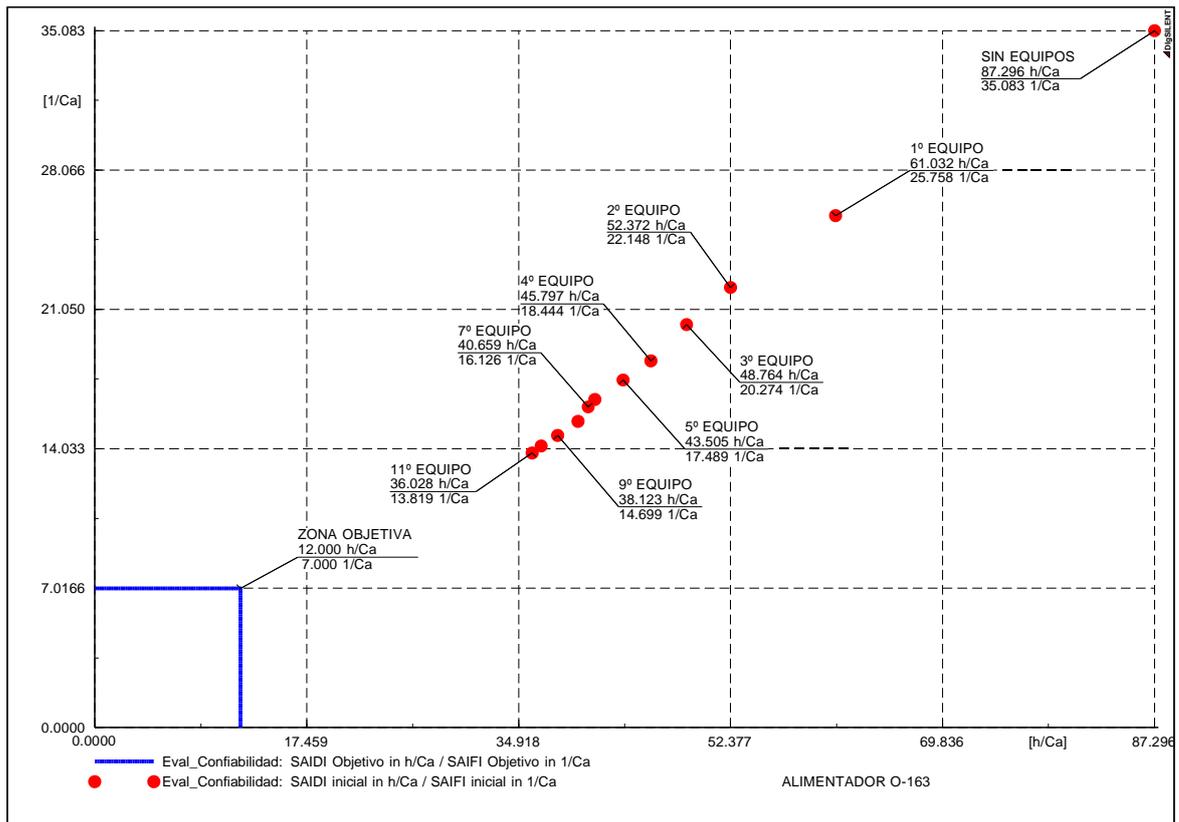


Figura 64: Gráfica de desempeño - Alimentador O-163.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En la gráfica de desempeño - alimentador O-164, se muestra la evolución de los índices de confiabilidad a medida que se implementa los equipos de protección, se aprecia que los dos primeros equipos de protección mejoran significativamente los índices de confiabilidad, sin embargo, el tercer equipo de protección se aprecia que la mejora de confiabilidad ya no es sustancial. Con esto podemos afirmar que necesariamente se debe de priorizar la reubicación de dos equipos de protección para mejorar los índices de confiabilidad. También se puede observar que aún no se logra llegar a la zona objetiva de acuerdo a las tolerancias establecidas por Osinergmin.

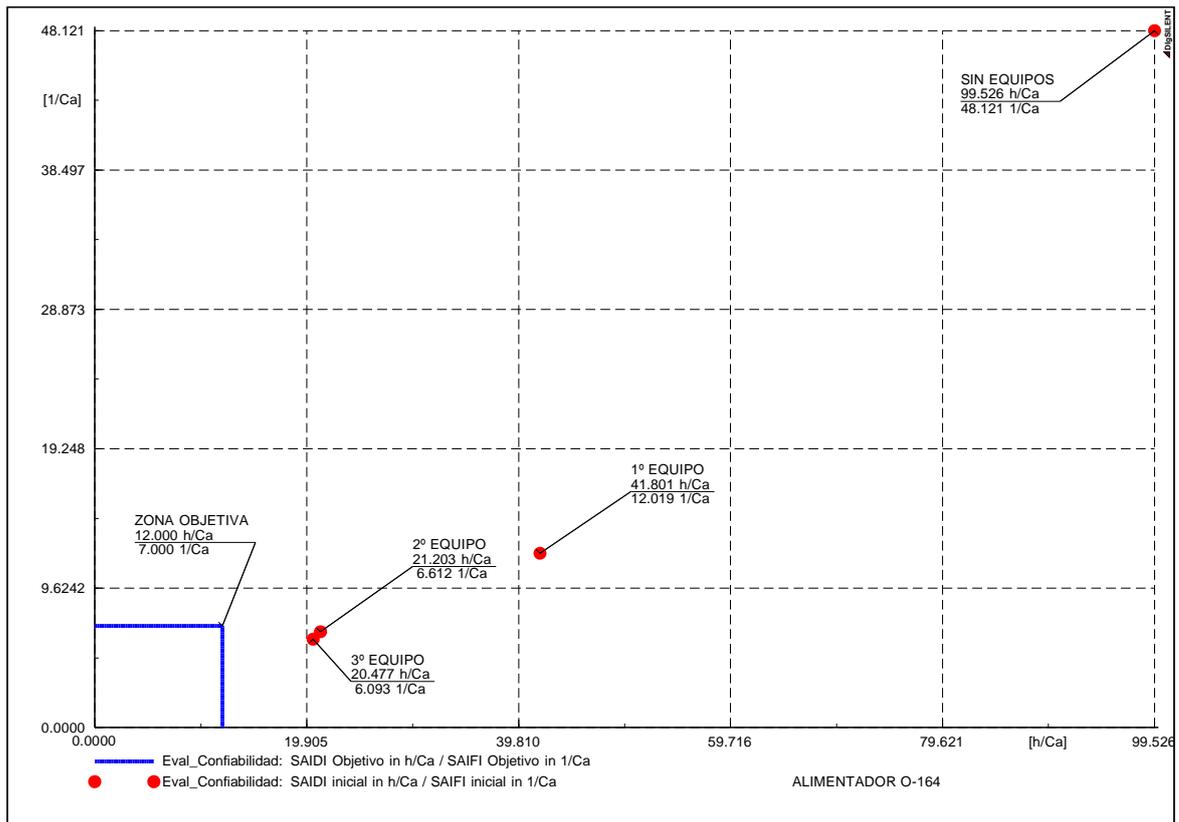


Figura 65: Gráfica de desempeño - Alimentador O-164.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En la gráfica de desempeño - alimentador O-165, se muestra la evolución de los índices de confiabilidad a medida que se implementa los equipos de protección, se aprecia que los tres primeros equipos de protección mejoran significativamente los índices de confiabilidad, sin embargo, a partir del cuarto equipo de protección se aprecia que la mejora de confiabilidad ya no es sustancial. Con esto podemos afirmar que necesariamente se debe de priorizar la reubicación de tres equipos de protección para mejorar los índices de confiabilidad. También se puede observar que aún no se logra llegar a la zona objetiva de acuerdo a las tolerancias establecidas por Osinergmin.

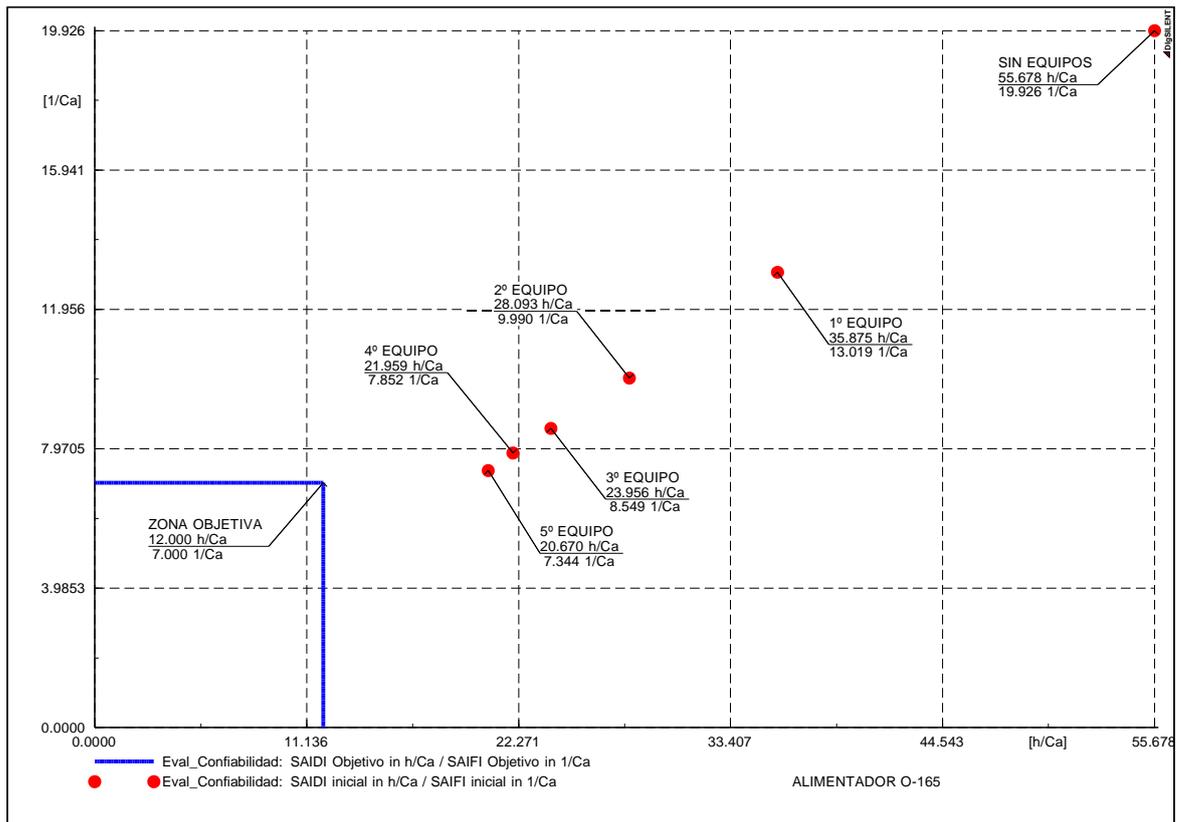


Figura 66: Gráfica de desempeño - Alimentador O-165.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

En las gráficas de barra de desempeño podemos apreciar el grado de incidencia en el SAIFI y SAIDI ubicando cierta cantidad de equipos de protección, también podemos apreciar que incrementando más equipos de protección ya no se resuelve el problema de reducir los índices de confiabilidad, con dicha información nos da una referencia de la cantidad adecuada de equipos de protección a utilizarse.

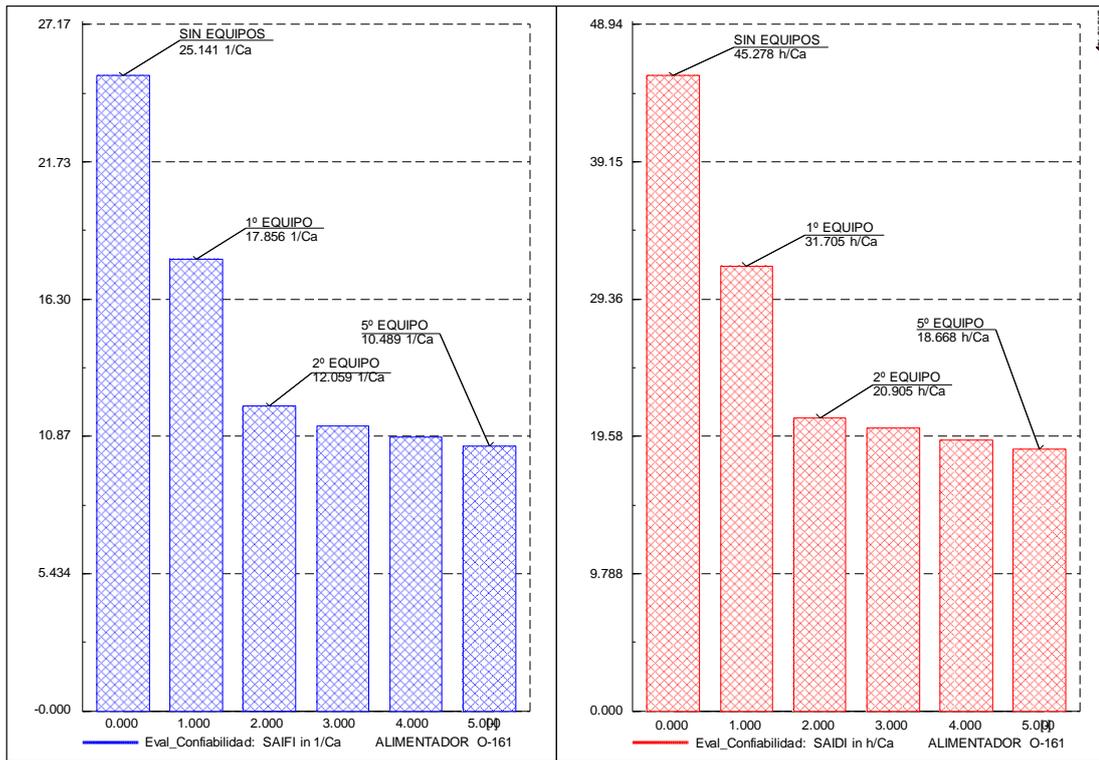


Figura 67: Barras de desempeño - Alimentador O-161.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

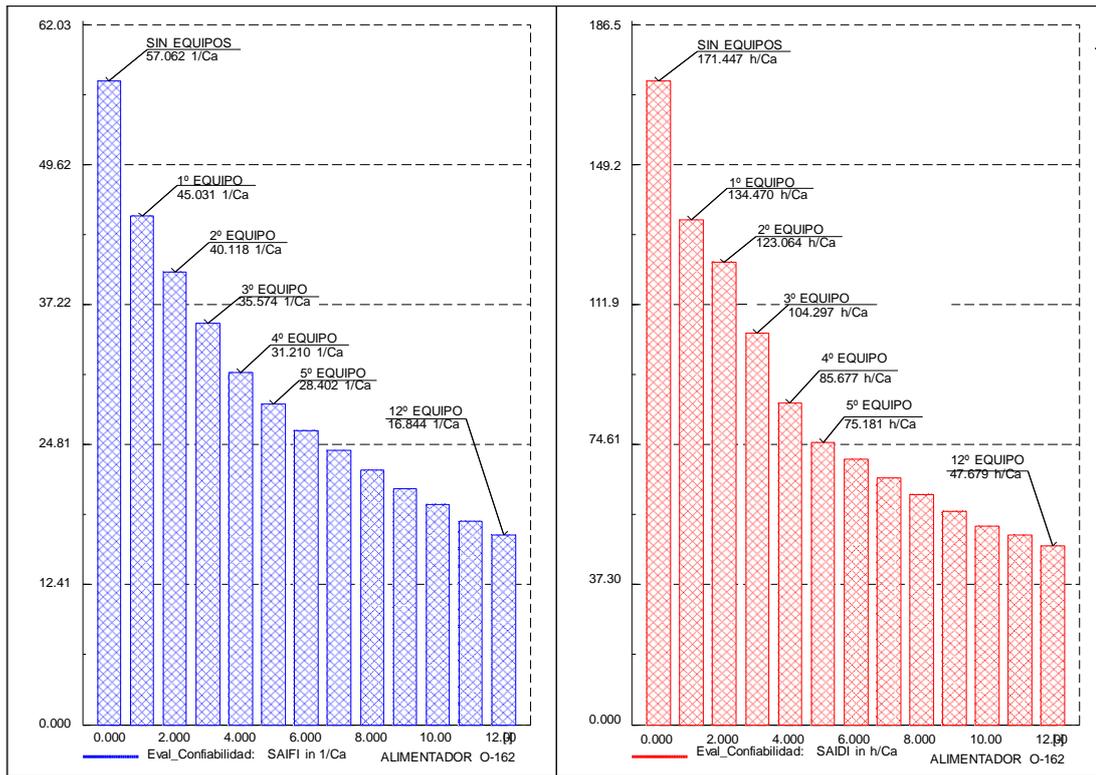


Figura 68:Barras de desempeño - Alimentador O-162.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

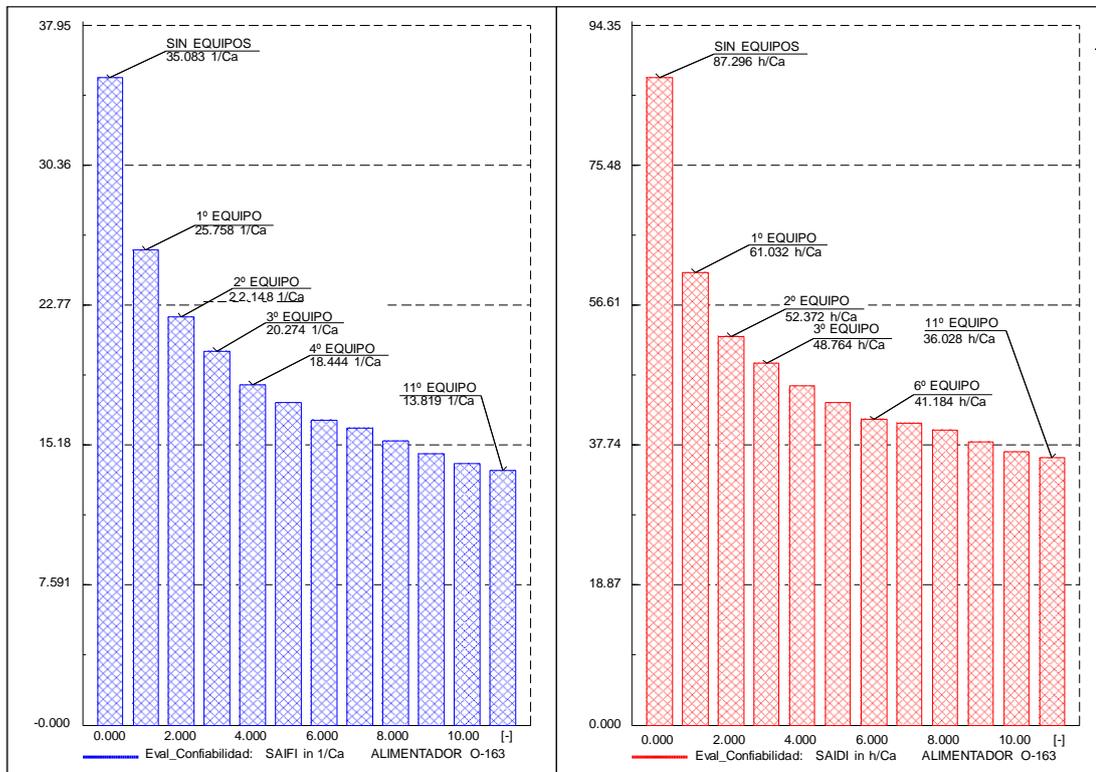


Figura 69:Barras de desempeño - Alimentador O-163.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

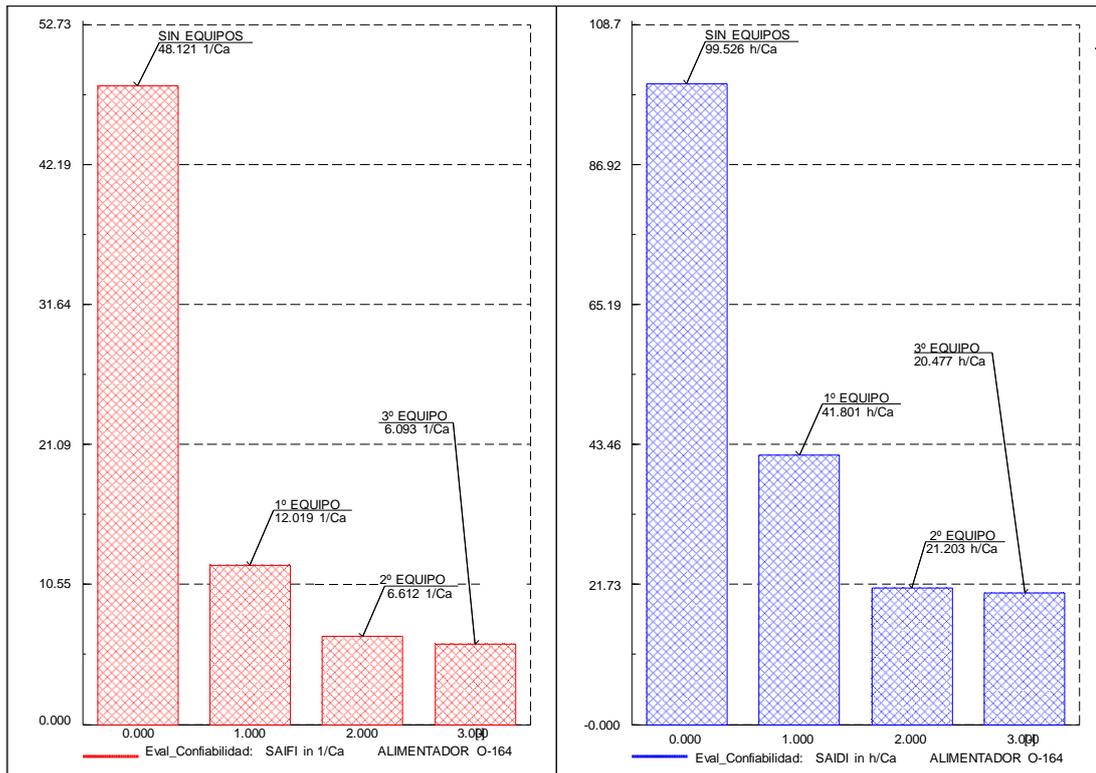


Figura 70: Barras de desempeño - Alimentador O-164.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

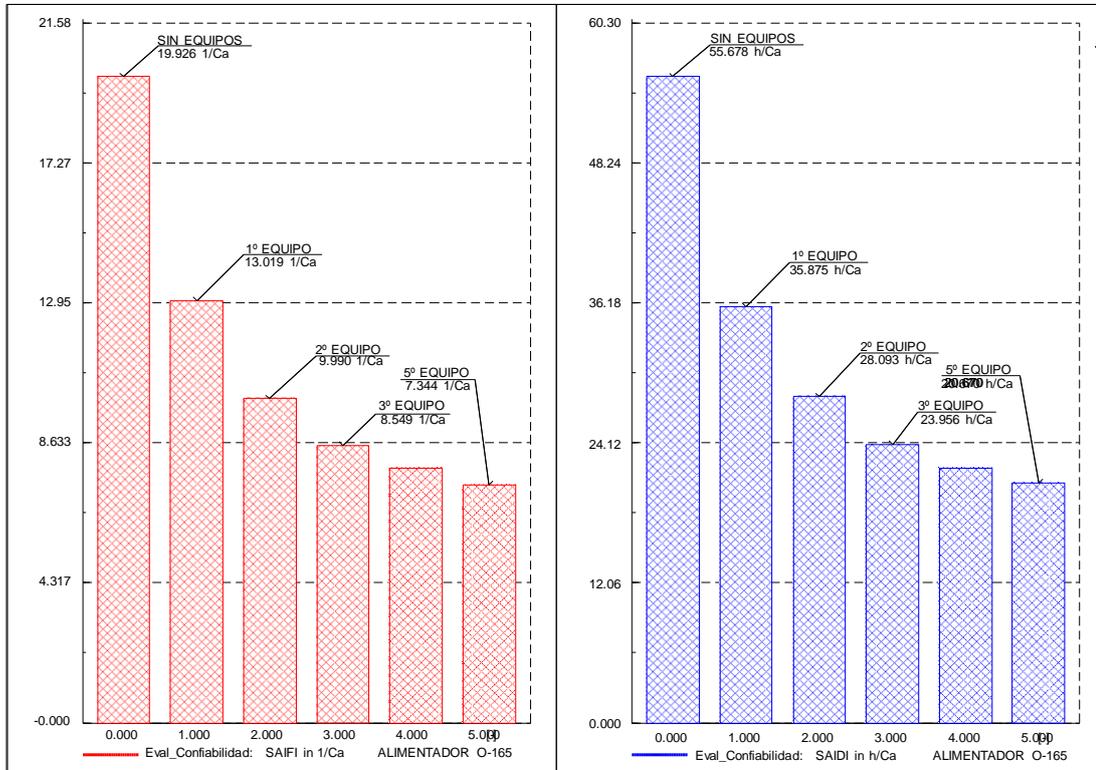


Figura 71: Barras de desempeño - Alimentador O-165.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Una vez encontrada las ubicaciones óptimas, se reubicó los equipos de protección como se muestra en el ANEXO G: ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD - REUBICACIÓN DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN.

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de los índices de confiabilidad, con la ubicación óptima de los equipos de protección.

Tabla 17: Resultados de los índices SAIFI y SAIDI por alimentador con ubicación óptima

Año	Sistema Eléctrico	Alimentador	Sector Típico	Numero Clientes	Indicadores ELS – con ubicación óptima	
					SAIFI	SAIDI
2019	Yarada (SE0113)	O-161	3	368	9.818	18.976
		O-162	3	486	13.314	34.214
		O-163	3	265	13.635	38.195
		O-164	3	2543	18.873	42.722
		O-165	3	446	7.117	19.983
		SE	3	4108	15.784	36.816

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Graficando los resultados de la tabla anterior, se apreciaría como lo mostrado en la siguiente figura.

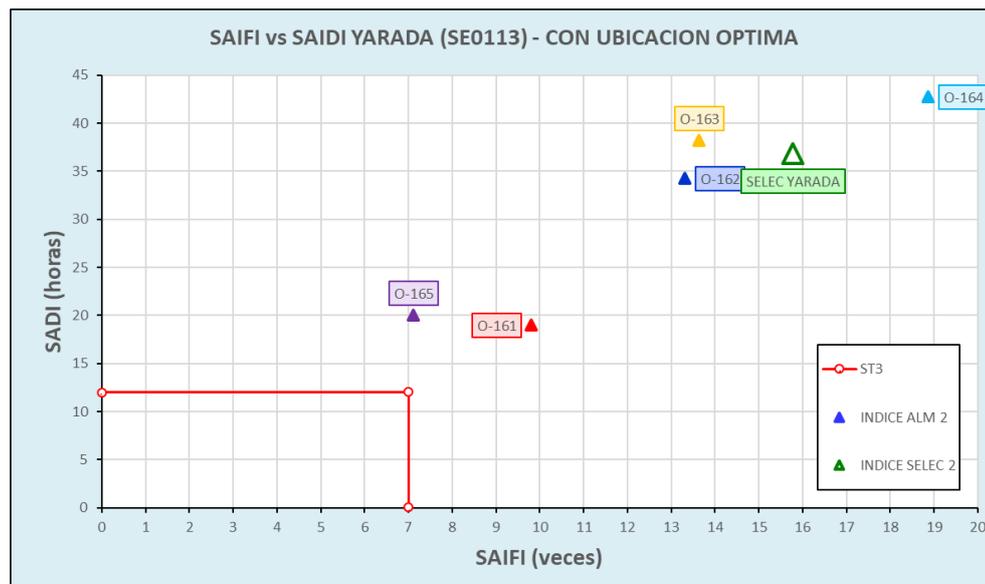


Figura 72: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada 2019 con ubicación óptima.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

4.5 DESEMPEÑO DE LA NUEVA PROPUESTA CON LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN

Los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, mejoraron con la reubicación de los equipos de protección a los lugares óptimos, como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 18: Resultados de los índices SAIFI y SAIDI - inicial vs con ubicación óptima.

Sistema Eléctrico	ALM	Indicadores ELS - Inicial		Indicadores ELS - con ubicación óptima		Variación	
		SAIFI	SAIDI	SAIFI	SAIDI	SAIFI	SAIDI
	O-161	24.066	44.076	9.818	18.976	59.2%	56.9%
	O-162	24.525	65.632	13.314	34.214	45.7%	47.9%
YARADA (SE0113)	O-163	22.615	56.977	13.635	38.195	39.7%	33.0%
	O-164	32.453	67.254	18.873	42.722	41.8%	36.5%
	O-165	18.137	51.083	7.117	19.983	60.8%	60.9%
	SELEC	28.568	62.558	15.784	36.816	44.7%	41.1%

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Como podemos observar en la tabla anterior, nuestros índices SAIFI y SAIDI calculados con las ubicaciones actuales son **28.568** y **62.558** respectivamente. Luego de realizar el cálculo de confiabilidad con las ubicaciones óptimas, se ha obtenido los siguientes resultados: SAIFI y SAIDI **15.784** y **36.816** respectivamente.

Graficando los resultados de la tabla 18, se apreciaría como lo mostrado en la siguiente figura.

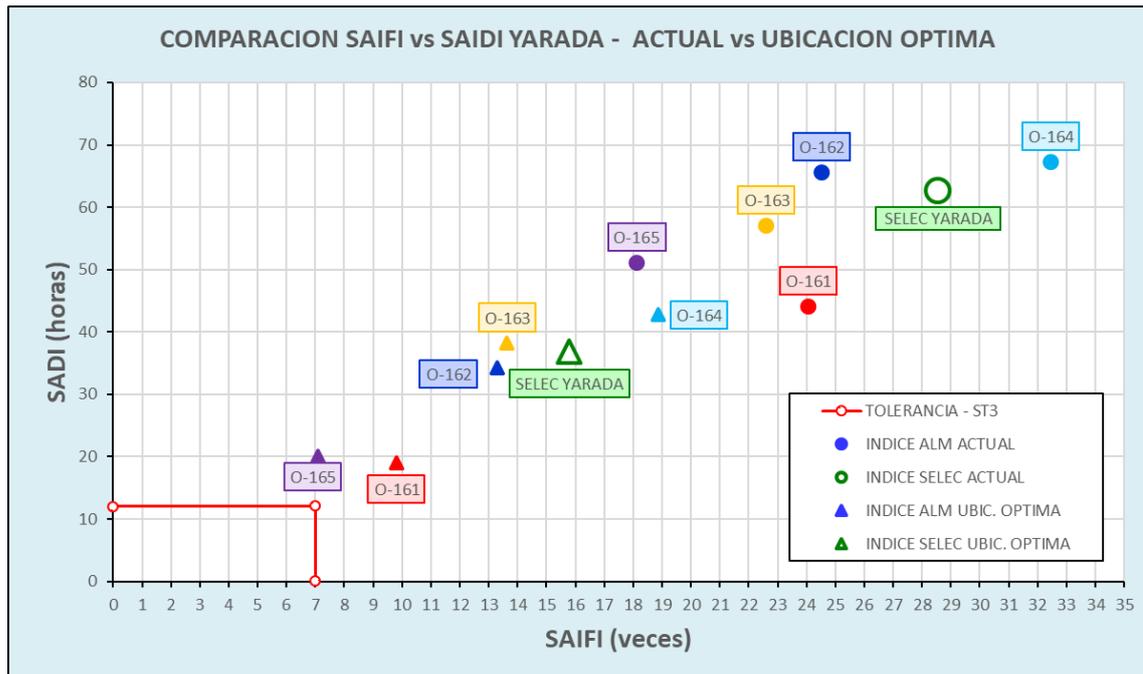


Figura 73: SAIFI y SAIDI del Sistema Eléctrico Yarada - inicial vs ubicación óptima.

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Como se puede apreciar en la gráfica los valores de los índices de confiabilidad por alimentador y sistema eléctrico con ubicación óptima, aún se encuentran fuera de la zona objetiva para el sector típico 3 establecido por Osinergmin, pero se logró mejorar los índices de confiabilidad en SAIFI **44.7%** y SAIDI **41.1 %** con respecto a los valores actuales (sin ubicación óptima).

Para corroborar los resultados de la tabla 18; la figura 74 muestra los resultados de los índices de confiabilidad SAIFI y SAIDI actuales. y la figura 75 muestra los resultados con la ubicación óptima calculados mediante el Software DigSilent Power Factory.

Name	In Folder	SAIFI 1/Ca	SAIDI h/Ca
✓ O-161	Network Data	24.06618	44.07621
✓ O-162	Network Data	24.5249	65.63152
✓ O-163	Network Data	22.61504	56.97726
✓ O-164	Network Data	32.45346	67.25409
▶ ✓ O-165	Network Data	18.13733	51.08299
✓ Summary Grid	MaxDem_2019 (Prote	28.56762	62.55807

Figura 74: Índices de confiabilidad inicial calculados mediante DigSilent Power Factory

(Elaborado por el equipo de trabajo)

Name	In Folder	SAIFI 1/Ca	SAIDI h/Ca
✓ O-161	Network Data	9.81797	18.97589
▶ ✓ O-162	Network Data	13.31413	34.21421
✓ O-163	Network Data	13.63499	38.19532
✓ O-164	Network Data	18.87324	42.72189
✓ O-165	Network Data	7.11746	19.98335
✓ Summary Grid	Analisis de Confiabilidad	15.78415	36.81599

Figura 75: Índices de confiabilidad calculados con la ubicación óptima mediante DigSilent Power Factory

(Elaborado por el equipo de trabajo)



4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de la presente tesis, estuvo orientado a determinar la ubicación óptima de los equipos de protección para mejorar los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, Tacna.

Se partió de la hipótesis general, donde se consideró una nueva propuesta de optimización para mejorar significativamente los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, para ello se desarrolló el algoritmo en DPL aplicado al sistema eléctrico para determinar las ubicaciones óptimas de equipos de protección e instalando en lugares adecuados se logra mejorar los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada, comprobándose esta hipótesis por las evidencias y los resultados obtenidos en la tabla 18.

También podemos ver que en las gráficas de barra de desempeño, se aprecia el grado de incidencia en los índices de confiabilidad, ubicando cierta cantidad de equipos de protección podemos apreciar que incrementando más equipos de protección ya no se resuelve el problema de reducir los índices de confiabilidad, dicha información nos da una referencia de la cantidad adecuada de equipos de protección a utilizarse, donde comprobamos como va disminuyendo los valores de los índices de confiabilidad por cada alimentador, notando la importancia de las primeras ubicaciones óptimas de los equipos de protección ya que son los que tienen los valores más altos de reducción de índices de confiabilidad en el sistema eléctrico Yarada, Tacna.



V. CONCLUSIONES

- Al realizar el diagnóstico de los índices de confiabilidad para el periodo anual (enero - diciembre 2019), se determinó que actualmente los valores del SAIFI y SAIDI superan las tolerancias exigidos por parte de Osinergmin. Se concluye que con la nueva propuesta de optimización de los equipos de protección del sistema eléctrico Yarada se logró mejorar significativamente los índices de confiabilidad con respecto a los valores iniciales.
- Se concluye que el reporte de interrupciones es de vital importancia para poder realizar el cálculo de los parámetros de confiabilidad, debido a que se obtienen datos mínimos requeridos como: duración de interrupción, número de usuarios afectados, número de usuarios totales del alimentador, para finalmente calcular los índices de confiabilidad.
- Para determinar la ubicación óptima de los equipos de protección en los alimentadores del sistema eléctrico Yarada, se ha requerido calcular los índices de confiabilidad en cada nodo que representa una estructura, el cálculo puede realizarse manualmente, pero, demandaría mucho tiempo realizarlo si la red es extensa, debido a ello, se realizó mediante un algoritmo DPL creado en el Software DigSilent Power Factory, el cual calcula los índices de confiabilidad de manera iterativa y automática en cada nodo, logrando así optimizar el tiempo requerido para determinar las ubicaciones óptimas de los equipos de protección en los alimentadores del sistema eléctrico Yarada, donde se concluye que, las ubicaciones actuales de los equipos de protección del sistema eléctrico Yarada no eran los adecuados, motivo por el cual los índices de confiabilidad SAIFI y SAIDI eran elevados.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a las empresas concesionarias de distribución de energía eléctrica, diagnosticar periódicamente en lapsos de un año la confiabilidad de sus sistemas eléctricos de distribución, debido a la constante expansión de las redes eléctricas, como también al incremento de usuarios.
- En el presente estudio se logró mejorar los índices de confiabilidad del sistema eléctrico Yarada con la reubicación de los equipos de protección iniciales, debido a ello se recomienda a la empresa concesionaria Electrosur S.A., reubicar sus equipos de protección a los lugares óptimos hallados en la presente tesis con el objetivo de mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico Yarada.
- Una vez reubicados los equipos de protección en los lugares óptimos, se recomienda realizar el estudio de la coordinación de protección, con la finalidad de buscar el menor impacto en la continuidad de la operación del sistema eléctrico ante la presencia de diversas fallas, cuidando la integridad de las personas y los equipos.
- Cuando no se logre mejorar los índices de confiabilidad con las ubicaciones óptimas de equipos de protección, es recomendable evaluar las causas de las interrupciones, para dar solución al problema identificado.
- Se recomienda a los futuros tesisistas realizar este tipo de investigación debido a que la sociedad cada vez es más exigente con la continuidad del suministro eléctrico.



VII. REFERENCIAS

- Albuja Jaramillo, G. (2019). *CÁLCULO DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD UTILIZANDO SIMULACIÓN MONTECARLO Y UBICACIÓN DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS*. Quito: Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional.
- Aquino Paco, S. (2018). *APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE RECONFIGURACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA REDUCIR PÉRDIDAS RESISTIVAS EN LA LÍNEA*. Arequipa: Repositorio de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Arce Lazo, E. S. (2010). *ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN ALTA Y MEDIA TENSIÓN EN LA SUBESTACIÓN MACHALA PROPIEDAD DE LA CORPORACIÓN NACIONAL DE ELECTRICIDAD S.A. - REGIONAL EL ORO*. Cuenca: Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Arriagada Mass, A. (1994). *EVALUACION DE CONFIABILIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCION*. Chile: Repositorio de la Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ayala Arciniegas, N. (2018). *OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SECCIONAMIENTO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN USANDO ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS*. Quito: Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Ayre Sánchez, J. H. (2005). *EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DE MODO DE FALLAS Y UBICACIÓN ÓPTIMA DE SECCIONADORES EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA*. Lima-Perú: Repositorio-UNI.



- Baca Cussi, C. D., & Loyaga Valdeiglesias, S. R. (2016). *ESTUDIO DE MEJORAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD DEL ALIMENTADOR EN MEDIA TENSIÓN TINTAYA 01, EN LA PROVINCIA DE ESPINAR*. Cusco: Repositorio de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Baena Paz, G. (2017). *Metodología de Investigación*. México: Grupo Editorial Patria.
- Billinton, R., & Wojczynski, E. (1985). *Distributional Variation Of Distribution System Reliability Indices*. Canadá: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.
- Chamorro Orbe, C. G. (2017). *LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE RECONECTADORES CON CRITERIOS DE CONFIABILIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL*. Quito - Ecuador: Repositorio - Escuela Politécnica Nacional.
- Chowdhury, A. A., & Koval, D. O. (2009). *Power Distribution System Reliability Practical Methods and Applications*. Canadá: IEEE Press Editorial Board.
- CNE SUMINISTRO. (2011). *CÓDIGO NACIONAL DE ELECTRICIDAD (SUMINISTRO 2011) - Ministerio de Energía y Minas*. Lima: Página web del Ministerio de Energía y Minas.
- COEPER PERU S.A.C. (10 de Diciembre de 2019). *Seccionador CUT-OUT Porcelana 27KV*. Obtenido de Seccionador CUT-OUT Porcelana 27KV: <http://coeperperu.com/seccionador-cut-out-porcelanato-27kv/>
- Collantes Véliz, R. S. (2010). *ANÁLISIS DE MEJORA DE LA CONFIABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE ALTA DENSIDAD DE CARGA*. Lima - Perú: Repositorio - Universidad Nacional de Ingeniería.
- Contreras Yáñez, M., & Jara Ramírez, M. (2017). *Actualidad en índices de confiabilidad de sistema y cliente, a nivel nacional e internacional en el área de sistemas*



- eléctricos de distribución*. Concepcion - Chile: Repositorio de la Universidad Del Bío - Bío.
- Cueva Rios, P. (2019). *EVALUACIÓN DE INDICES DE CONFIABILIDAD EN REDES DE ELECTROCENTRO S.A. PARA MEJORAR LA CALIDAD DE SERVICIO UTILIZANDO REDES NEURONALES*. Callao: Repositorio de la Universidad Nacional del Callao.
- Dammert Lira, A., Molinelli Aristondo, F., & Carbajal Navarro, M. (2011). *Fundamentos Técnicos y Económicos del Sector Eléctrico Peruano*. Lima: Osinergmin - Grapex Perú S.R.L.
- Díaz Vera, J. P. (2000). *EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN EL MARCO REESTRUCTURADO DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS COMPETITIVOS*. Santiago - Chile: Repositorio - Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Duque Posada, B. S. (2016). *DISEÑO DE RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA (BAJA TENSIÓN) PARA UN SECTOR DE 250 VIVIENDAS CORALES -CUBA*. Pereira: Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira.
- Fernández Ramírez, C. A. (2014). *Metodología de evaluación de confiabilidad para estudios de planeamiento del sistema de transmisión colombiano*. Medellín - Colombia: Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia.
- Flores Marcelo, J. (2015). *EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN UNA REFINERÍA DE HIDROCARBUROS*. Piura: Repositorio de la Universidad de Piura.
- Flores, M. P., Torres, J. G., Rodríguez, J. H., & Alcaraz, A. M. (2010). *Confiabilidad Operativa de Sistemas para Compresión de Gas y Generación Eléctrica en*



- Complejos Petroleros*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Procesos Térmicos.
- Gómez Expósito, A. (2002). *Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica*. Madrid - España: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA. S.A.U.
- Gonzales Arias, A. (28 de mayo de 2007). *Mejoramiento de la Confiabilidad en Sistemas de Distribución Mediante Reconfiguración de Circuitos Primarios*. Pereira: Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de Diagrama de sistema convencional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica: <https://jmirez.wordpress.com/2011/05/28/j266-diagrama-de-sistema-convencional-de-generacion-transmision-y-distribucion-de-energia-electrica/>
- Grupo EPM. (2018). *ESPECIFICACIÓN TÉCNICA SECCIONADOR TIPO CUCHILLA*. Medellín: Centros de Excelencia Técnica - Unidad de Normalización y Laboratorios.
- Hernandez Angel, M. E. (18 de 05 de 2011). *Blogger-Cuchillas*. Obtenido de Blogger-Cuchillas: <http://grupo2tecnologiasenacodensa.blogspot.com/p/cuchillas.html>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: The McGraw-Hill Companies.
- IEEE STANDARD 1366. (2012). *Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices – Revision*. Washington D. C.: IEEE.
- León Carrera, A., & Villón Villacreses, J. (2002). *Estudio de Coordinación de las protecciones eléctricas para la Empresa Eléctrica Península de Santa Elena (EMEPE) año 2001, Sub-Estaciones: Sta. Rosa, Libertad, Salinas y Chipipe*. Guayaquil - Ecuador: Repositorio-Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Mechán Pisfil, J. (2019). *SUMINISTRO, TRANSPORTE, MONTAJE, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE EQUIPOS DE PROTECCION EN LA LÍNEA DE*



MEDIA TENSIÓN 22,9 KV, EN EL FUNDO LOTE NORTE - ARENA VERDE S.A.C., OLMOS LAMBAYEQUE. Lambayeque - Perú: Repositorio - Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Morales Pazmiño, M. (2018). *SELECCIÓN Y UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS DE SECCIONAMIENTO Y PROTECCIÓN EN ALIMENTADORES PRIMARIOS COMO UNA ESTRATEGIA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN.* Quito - Ecuador: Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional.

Morán Delgado, G., & Alvarado Cervantes, D. (2010). *Métodos de Investigación.* México: Pearson Custom Publishing.

Muñoz Saucedo, J. (2018). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA INSTALACIÓN DE SEÑALIZADORES DE FALLAS PARA INCREMENTAR LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN EN MEDIA TENSIÓN.* Chiclayo: Repositorio de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

Narvaez Lopez, Y. E., & Prado Linero, K. D. (2012). *DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA Y BAJA TENSION PARA LA NORMALIZACIÓN DEL BARRIO EL PIÑONCITO DE CAMPO DE LA CRUZ.* Barranquilla: Repositorio-Universidad de la Costa CUC.

Norma EC 010. (2006). *REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.* Lima: Diario oficial El Peruano.

Omega Electric. (10 de Diciembre de 2020). *Omega Electric Servicios Industriales Olaya S.A.C.* Obtenido de Omega Electric Servicios Industriales Olaya S.A.C.: <https://transformadoressiosac.com/que-es-un-reconectador/>



- Ordoñez Sanclemente, J. P., & Nieto Alvarado, L. G. (2010). *Mantenimiento de Sistemas Eléctricos de Distribución*. Guayaquil: Repositorio - Universidad Politécnica Salesiana.
- OSINERG N° 010-2004-OS-CD. (2004). *Directiva para la Evaluación de Solicitudes de Calificación de Fuerza*. Lima: Diario Oficial El Peruano.
- OSINERG N° 074-OS/CD. (2004). *Procedimiento para la Supervisión de la Operación de los Sistemas Eléctricos*. Lima: Diario El Peruano.
- Pareja Espinoza, J., & Pérez Pineda, R. (2017). *LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL*. Quito: Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Pérez Farge, D. (2011). TRABAJO DE INVESTIGACION SOBRE RED DE DISTRIBUCION SECUNDARIO 220V. *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERU - RED DE DISTRIBUCION SECUNDARIA*, 1-16.
- Quispe Chavez, M. J. (2019). *REDUCCIÓN DE LAS INTERRUPCIONES ELÉCTRICAS POR UBICACIÓN ADECUADA DE RECONECTADORES AUTOMÁTICOS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO RURAL EN 22.9 kV – SATIPO*. Huancayo: Repositorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Quispe Huaranga, W. (2019). *MEJORAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD MEDIANTE LA REUBICACIÓN DE SECCIONADORES EN EL ALIMENTADOR A4803 DE LA SUBESTACIÓN CHANCHAMAYO*. Huancayo: Repositorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú.
- R.D. N° 018-2002-EM/DGE. (2002). *Norma de Procedimientos para la Elaboración de Proyectos y Ejecución de Obras en Sistemas de Distribución y Sistemas de*



- Utilización en Media Tensión en Zonas de Concesión de Distribución.* Lima:
Diario Oficial El Peruano.
- Ramírez Castaño, S. (2018). *PROTECCIONES DE SISTEMAS ELECTRICOS.*
Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- RESEAD. (2016). *automatización de equipos de protección y su integración scada.*
Lima, Perú: Innóvate Perú.
- Rojas Bravo, Lennart;TECSUP. (2017). *SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN.*
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN, 1-19.
- Rudnick, H., & Watts, D. (2004). *SEGURIDAD Y SUFICIENCIA EN EL SUMINISTRO
DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.* Lima: Pontifice Universidad Católica de Chile.
- Salazar, G., Chusin , L., & Escobar, B. (2015). *Análisis de Confiabilidad de Sistemas de
Distribución Eléctrica con Penetración de Generación Distribuida.* Quito -
Ecuador: Repositorio de la Escuela Politecnica Nacional - Ingeniería Eléctrica y
Electrónica.
- Sayas Poma, L. (2013). *Ubicación Óptima de Equipos de Seccionamiento, Protección e
Impacto de la Instalación de Indicadores de Fallas en los Índices de
Confiabilidad.* Medellín - Colombia: VII simposio internacional sobre calidad de
la energía eléctrica.
- Simeon Pucuhuayla, F. (2019). *UBICACIÓN ÓPTIMA DEL SECCIONADOR FUSIBLE
PARA MEJORAR LOS INDICADORES SAIDI Y SAIFI EN EL SISTEMA
ELÉCTRICO RURAL DE AYACUCHO.* Huancayo: Respositorio de la
Universidad Nacional del Centro del Perú.
- SINGELEC. (2021). *CONFIABILIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE
DISTRIBUCION.* Lima: SINGELEC.



- Tapia Taramuel, C. L. (2019). *ESTUDIO DE CONFIABILIDAD EN LOS ALIMENTADORES DE LA SUBESTACIÓN CAYAMBE*. Ibarra - Ecuador: Repositorio de la Universidad Técnica del Norte.
- Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. (2015). Conceptos básicos de Sistemas de Potencia. En *Conceptos básicos de Sistemas de Potencia* (págs. 1-32). México: Repositorio - UNAM.
- Vargas Jiménez, D. (2015). *Estudio de indicadores de calidad del suministro de energía eléctrica de una red de distribución a 13.2 kV*. Manizales-Colombia: Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia.
- Yebra Morón, J. A. (2009). *Sistemas Eléctricos de Distribución*. Barcelona, Bogotá, Buenos Aires, Caracas y México: Reverté.
- Zapata, C. (2011). *CONFIABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA*. Colombia: Repositorio de la Universidad Tecnológico de Pereira.



ANEXOS

- ANEXO A: DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL - S.E. YARADA
- ANEXO B: DIAGRAMA UNIFILAR POR ALIMENTADORES – S.E. YARADA
- ANEXO C: PLANOS DE EQUIPOS DE PROTECCION
- ANEXO D: REPORTE DE INTERRUPCIONES – ELECTROSUR S.A. 2019
- ANEXO E: ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD – SECTORIZACIÓN
- ANEXO F: EVALUACIÓN DE CONFIABILIDAD – UBICACIÓN ÓPTIMA DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN CON DPL
- ANEXO G: ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD - REUBICACIÓN DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN