



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL PLAN DE MODERNIZACIÓN Y MANTENIMIENTO
DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA
HIDROELÉCTRICA JURÚN MARINALÁ A PARTIR DE EVALUACIÓN DE CRITICIDAD Y
ESTRÉS OPERACIONAL**

Antony Francisco Fuentes Monzón

Asesorado por el Mtro. Ing. Daniel Angel Figueroa García

Guatemala, junio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL PLAN DE MODERNIZACIÓN Y MANTENIMIENTO
DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA
HIDROELÉCTRICA JURÚN MARINALÁ A PARTIR DE EVALUACIÓN DE CRITICIDAD Y
ESTRÉS OPERACIONAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANTONY FRANCISCO FUENTES MONZÓN

ASESORADO POR EL MTRO. ING. DANIEL ANGEL FIGUEROA GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JUNIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL PLAN DE MODERNIZACIÓN Y MANTENIMIENTO
DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA
HIDROELÉCTRICA JURÚN MARINALÁ A PARTIR DE EVALUACIÓN DE CRITICIDAD Y
ESTRÉS OPERACIONAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 07 de agosto de 2021.

Antony Francisco Fuentes Monzón



EEPFI-PP-0118-2022

Guatemala, 12 de enero de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingeniería Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera


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

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **PLAN DE MODERNIZACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA HIDROELÉCTRICA JURÚN MARINALÁ A PARTIR DE EVALUACIÓN DE CRITICIDAD Y ESTRÉS OPERACIONAL.**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Diseño y Conservación de Materiales - Utilización de técnicas adaptables para la Innovación de materiales y equipos y su mantenimiento preventivo**, presentado por el estudiante **Antony Francisco Fuentes Monzon** carné número **200010789**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Ingeniería De Mantenimiento.


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

Atentamente,

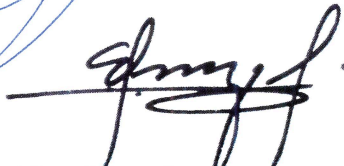
"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Daniel Angel Figueroa Garcia
Asesor(a)



Daniel Angel Figueroa Garcia
Ing. Mecánico Electricista
Colegiado 13087



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



Mtra. Rocio Carolina Medina Galindo
Coordinador(a) de Maestría





EEP-EIME-0118-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **PLAN DE MODERNIZACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA HIDROELÉCTRICA JURÚN MARINALÁ A PARTIR DE EVALUACIÓN DE CRITICIDAD Y ESTRÉS OPERACIONAL.**, presentado por el estudiante universitario **Antony Francisco Fuentes Monzon**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


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


Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.419.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL PLAN DE MODERNIZACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA HIDROELÉCTRICA JURÚN MARINALÁ A PARTIR DE EVALUACIÓN DE CRITICIDAD Y ESTRÉS OPERACIONAL**, presentado por: **Antony Francisco Fuentes Monzón**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabeia Cordova Escobar
Decana



Guatemala, junio de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre

Arlette Angelina Monzón Orozco (q. e. p. d.),
gracias por darme todo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por brindarme la oportunidad de cursar una carrera profesional.

Facultad de Ingeniería Por proporcionarme los conocimientos que me permitieron realizar este trabajo de graduación.

Familia Fuentes Velásquez Por brindarme su hogar durante mi estancia como estudiante.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Descripción y delimitación del problema.....	7
3.2. Pregunta central de investigación.....	8
3.3. Preguntas orientadoras	8
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. OBJETIVOS	11
5.1. General.....	11
5.2. Específicos	11
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	13
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Ingeniería y diseño	18
7.1.1. Dibujos.....	19

7.1.2.	Información de equipos existentes	20
7.1.3.	Diagramas unifilares.....	21
7.1.3.1.	Información requerida	21
7.1.3.2.	Equipo para levantamiento de campo .	26
7.1.4.	Corrientes de corto circuito.....	27
7.1.4.1.	Modelado de instalación eléctrica	27
7.1.4.2.	Cálculo de corriente de falla	28
7.2.	Sistema eléctrico.....	32
7.2.1.	Sistema de distribución	32
7.2.1.1.	Sistema radial simple	33
7.2.1.2.	Sistema radial expandido	34
7.2.1.3.	Sistema selectivo primario.....	35
7.2.1.4.	Sistema de lazo primario	36
7.2.1.5.	Sistema selectivo secundario	37
7.2.1.6.	Red secundaria spot	38
7.2.2.	Sistemas de emergencia	39
7.2.2.1.	Sistemas redundantes.....	40
7.2.2.2.	Generadores de emergencia.....	42
7.2.2.3.	Transferencia eléctrica	43
7.2.3.	Filosofía de operación	43
7.2.4.	Protecciones eléctricas.....	44
7.2.4.1.	Coordinación de protecciones	46
7.3.	Evaluación de equipos	47
7.3.1.	Condiciones operativas	51
7.3.2.	Mantenimiento.....	52
7.3.2.1.	Deterioro y causas de falla eléctrica....	52
7.3.2.2.	Programas de mantenimiento	52
7.3.2.3.	Tipo de mantenimiento	53
7.3.2.4.	Historiales de mantenimiento	54

	7.3.2.4.1.	Características de falla	54
	7.3.2.4.2.	Efectos de fallas	54
	7.3.2.4.3.	Costos	55
	7.3.2.4.4.	Capacidades y procedimientos de mantenimiento	55
	7.3.2.5.	Repuestos.....	56
7.4.		Confiabilidad de redes eléctricas.....	57
	7.4.1.	Distribución de probabilidad.....	58
	7.4.1.1.	Confiabilidad de sistemas en serie	59
	7.4.1.2.	Confiabilidad de sistemas con redundancia	59
	7.4.2.	Evaluación de confiabilidad	59
	7.4.2.1.	Suministro de energía.....	59
	7.4.2.2.	Configuración.....	60
	7.4.2.3.	Control y protección.....	60
	7.4.2.4.	Instalación física	60
	7.4.2.5.	Operación y mantenimiento	61
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	63
9.		METODOLOGÍA.....	67
	9.1.	Diseño de investigación.....	67
	9.2.	Tipo de estudio	67
	9.3.	Alcance de investigación	67
	9.4.	Variables e indicadores	68
	9.5.	Fases de investigación	68
	9.6.	Muestreo.....	70
	9.7.	Resultados esperados	70

10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	71
11.	CRONOGRAMA	73
12.	FACTIBILIDAD DE ESTUDIO Y RECURSOS NECESARIOS	75
	REFERENCIAS	77
	APÉNDICES.....	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución	13
2.	Corriente de falla típica	30
3.	Sistema radial simple	34
4.	Sistema radial expandido	35
5.	Sistema selectivo primario	36
6.	Sistema selectivo secundario	37
7.	Sistema selectivo secundario	39
8.	N+1 generadores y módulos de UPS	41
9.	Pasos para el diseño de protecciones y coordinación	45
10.	Cronograma investigación.....	73

TABLAS

I.	Transformadores.....	22
II.	Tableros de potencia y CCM.....	22
III.	Interruptores.....	23
IV.	Relé de protección	23
V.	Interruptores de baja tensión.....	24
VI.	Cableados.....	24
VII.	Motores.....	25
VIII.	Generadores.....	25
IX.	Cargas no motoras.....	26

X.	Banco de capacitores	26
XI.	Herramientas y equipo.....	27
XII.	Clasificaciones de generadores impulsados por motor.....	42
XIII.	Lista de funciones de relevadores de uso común.....	45
XIV.	Sufijos aplicados al número de función de relevadores	46
XV.	Fuente de datos para el análisis RCM.....	56
XVI.	Variables e indicadores.....	68
XVII.	Presupuesto de investigación	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\$	Dólar estadounidense
°	Grados
°C	Grados Celsius
Hz	Hercio
h	Horas
=	Igual que
kV	Kilovoltio
m	Metro
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
W	Vatio

GLOSARIO

AMECF	Análisis de modo, efectos y criticidad de falla.
Casa de máquinas	Infraestructura en donde se encuentra la o las turbinas de una central hidroeléctrica.
CCM	Centro de Control de Motores.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
MTBF	Tiempo medio entre fallos (<i>Mean time between failures</i>)
PLC	Controlador lógico programable.
RCM	Mantenimiento centrado en confiabilidad (Reliability Centered Maintenance).
SNI	Sistema nacional interconectado.
Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en voltios.
Transformador	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.

Vatio

Unidad de medida de potencia

RESUMEN

Los primeros proyectos de generación hidroeléctrica en Guatemala datan del año 1927 y varios de ellos siguen funcionando con pocos o ningún cambio en el equipamiento para la distribución eléctrica, varios de estos equipos ya son obsoletos y no cuentan más con soporte o repuestos de fábrica, por lo que la confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico de estas instalaciones depende principalmente del plan de mantenimiento y reparaciones que puedan efectuarse.

En este diseño de investigación se intentará definir un procedimiento para analizar el riesgo, evaluar el estado de los equipos y generar un plan para modernizar una instalación eléctrica y con ello mejorar su confiabilidad, y como complemento de las mejoras se definirá un plan de mantenimiento que ayude a ampliar el tiempo de vida útil del equipo.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo propone la innovación del sistema de distribución eléctrica de los servicios auxiliares de hidroeléctrica Jurún Marinalá, por medio de un plan estructurado de modernización y mantenimiento de los equipos existentes con el propósito principal de aumentar la confiabilidad del sistema.

Los equipos actuales tienen más de 50 años de estar en servicio, estos presentan deterioro en sus piezas, ya no cuentan con soporte por el fabricante o repuestos y su tecnología de construcción no permite plantear algún tipo de reacondicionamiento, esto disminuye la confiabilidad del sistema y en caso de fallar alguno de sus componentes puede provocar largos paros no programados para su reparación, con este panorama la hidroeléctrica deja abierta una alta probabilidad de no cumplir su misión, que es proveer de energía limpia al país.

La implementación de la solución que se desarrollara en la investigación es de mucha importancia para el INDE, porque hidroeléctrica Jurún Marinalá representa el 12 % del total de la energía limpia del INDE capaz de suministrar y para Guatemala es trascendental porque garantiza el poder mantener en un gran porcentaje de la población el aporte del INDE a la tarifa social de energía que llega a varias familias.

En el capítulo I de la investigación se presentará información de distintas fuentes bibliográficas y experiencias propias que darán forma al marco teórico, base de la investigación, se expondrá cual es la información mínima requerida para plantear un plan de modernización y mantenimiento, la forma de obtenerla, analizarla y administrarla para ese fin. Se desarrollarán temas necesarios para el

proceso de investigación como: topologías de red, evaluación física de equipos, análisis de probabilidad de fallas y matrices de criticidad.

En el capítulo II se hará el desarrollo de la investigación.

En el capítulo III se hará la presentación de resultados.

En el capítulo IV se hará la discusión de resultados.

2. ANTECEDENTES

Campos-López, Toledo-Velásquez, y Tolentino-Eslava, (2019) presentan la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos, incluyendo algunos pasos que facilitan la aplicación, la investigación incluye algunos casos de estudio. Como resultado se tiene la metodología de RCM aumentada que exponen que permite la consideración de bases de datos existentes de tipos de fallas de equipo eléctrico, para definir prioridades de riesgo y jerarquizar las fallas, un aporte muy importante para este trabajo que permitirá proponer un orden de ejecución del plan de modernización y mantenimiento del equipo eléctrico de los servicios auxiliares de hidroeléctrica Jurún Marinalá.

Vargas y Ospina, (2018) realizaron un proyecto en el que desarrollan conceptos de coordinación de protecciones y tipos de curvas a utilizar en servicios auxiliares de una central hidroeléctrica. Como resultados presentan una guía muy completa con recomendaciones y criterios importantes a considerar al momento de implementar un estudio de coordinación de protecciones. Este documento aporta metodologías para realizar la coordinación de protecciones y una lista de las distintas protecciones a considerar en una hidroeléctrica.

Iglesias, (2010) propone el estudio de los sistemas de servicios auxiliares en subestaciones de potencia. Elaboró una estructura de procedimientos que permiten optimizar el cálculo y la selección de equipos para el diseño de servicios auxiliares. El documento aporta ideas para el proceso de levantamiento de información que será necesario realizar para recopilación de información para este trabajo.

Sierr-Gil y Lajes-Choy , (2010) realizaron un trabajo en el que ofrece una panorámica acerca de la evolución de los métodos de evaluación de la confiabilidad y las especificaciones de estos durante el diseño de redes eléctricas de distribución, muestran cómo utilizar los distintos métodos dependiendo no solo de la disponibilidad de datos, sino también del enfoque que se le dé al estudio en cuestión, la selección de variantes durante el diseño y las opciones de mejora de confiabilidad durante la explotación o gestión de mantenimiento. El documento aporta una metodología para definir tiempos de interrupción, número de interrupciones e índice de disponibilidad de las redes, datos que deberán calcularse para este trabajo.

IEEE, (2012) realizó una encuesta patrocinada por IEEE acerca de confiabilidad de equipos eléctricos en plantas industriales la cual fue completada en 1972. Los resultados de la encuesta incluyeron un total de 1982 fallas de equipos que fueron reportadas por 30 compañías que cubren 68 plantas en nueve industrias en los Estados Unidos y Canadá. Esta colección de datos proporciona al analista opciones para determinar los parámetros de confiabilidad para sistemas eléctricos más antiguos. El aporte práctico a este trabajo es la información recopilada por varios años, la cual es útil para determinar la confiabilidad o disponibilidad del sitio, siendo claro que el valor real se predice para un sistema específico, pero las comparaciones entre sistemas son de mucho valor y ayudan a identificar áreas que puedan necesitar más tiempo de mantenimiento, redundancias o reemplazos.

Martínez, (2017) en su trabajo explica “los requisitos mínimos de protecciones eléctricas con que deben contar las plantas de generación que se interconectan al sistema eléctrico nacional, con el fin de garantizar la operación segura y confiable del sistema” (p. 7). Al estar la planta hidroeléctrica Jurún

Marinalá interconectada a este sistema es necesario garantizar que el sistema de protecciones cumple con estos requisitos mínimos.

Meza, (2006) expone información valiosa sobre plantas eléctricas de emergencia en sistemas redundantes críticos como lo son los utilizados en centros de cómputo y de datos, que requieren alta seguridad y evitar pérdidas financieras. En el trabajo se describen las categorías, las potencias y características de los generadores típicamente comercializados, con la información recabada en esa investigación se podrá comprender un poco más sobre estos componentes importante en sistemas altamente confiables y la necesidad o no de modernizarlo.

Luna, (2006) plantea en su investigación el funcionamiento de interruptores en sistemas de transferencias automáticas asociados a subestaciones, las condiciones para su funcionamiento, enclavamientos eléctricos y mecánicos en sistemas hasta de cuatro generadores, esos algoritmos aportarán a esta investigación propuestas para las secuencias de funcionamiento y evaluación de los sistemas de control existentes previo a plantear un plan de modernización.

Martínez, (2010) enlista en su investigación los tipos de fallas en sistemas eléctricos industriales, como identificarlas y las condiciones que las propician e incluso plantea una forma de analizarlas, menciona una auditoría eléctrica como el primer paso hacia la identificación de la base instalada en un sistema, estos conceptos propician ideas de como iniciar con el trabajo en campo para nutrir esta investigación.

Pérez, (2013) describe los equipos eléctricos que se encuentran típicamente en una hidroeléctrica y su función en el proceso de generación de

energía, a partir de esta información plantea la implementación de un plan de mantenimiento proactivo, su investigación brinda una idea general de lo que se encontrara en el trabajo de campo y permite preparar algunas tablas genéricas de recolección de información y poder emplearlas en esta investigación y en futuros trabajos similares.

Partiendo de estas investigaciones nos permite pensar que existe una relación directa entre el estado general de los equipos eléctricos de una instalación y la confiabilidad que puedan brindar a los usuarios y que el contar con un plan de mantenimiento puede variar considerablemente este factor para bien o para mal si no se realiza de una forma estructurada como se planteará en este trabajo.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Descripción y delimitación del problema

La fiabilidad del sistema de distribución eléctrica de los servicios auxiliares de una planta hidroeléctrica depende directamente de la detección de cualquier anomalía. La detección de anomalías pretende identificar averías o fallas operacionales en cualquiera de los equipos que componen el sistema. Para aumentar la fiabilidad también se requiere de mantenimiento con la finalidad de minimizar el efecto de envejecimiento de partes y componentes. Proporcionar una ruta para las actividades de modernización y mantenimiento de equipos eléctricos de más de veinte años de antigüedad es un problema recurrente en las instalaciones eléctricas en general. Ello se debe a largos períodos de inactividad requeridos para sustituir los equipos obsoletos y los costos debidos a la inversión de capital en equipo nuevo que esto conlleva.

En este documento se plantea el proceso ordenado para la creación de un plan de modernización y mantenimiento para el sistema de distribución eléctrica en media y baja tensión de los servicios auxiliares de hidroeléctrica Jurún Marinalá, puesta en funcionamiento desde el 10 de enero de 1970.

Con este plan se procura recuperar la fiabilidad perdida del sistema de distribución de los servicios auxiliares de la hidroeléctrica a causa del envejecimiento normal de los equipos, al paulatino fin de refaccionamiento y soporte del fabricante de los equipos. Las causas que generan el problema normalmente son el envejecimiento de los equipos que forman el sistema de distribución eléctrica en media o baja tensión y el mantenimiento sin evaluar la

criticidad y condición de los activos. Las consecuencias del problema conllevan a no tener un plan de inversión o modernización ordenado, una ruta poco clara de las actividades de mantenimiento, refaccionamiento y consecuentemente una baja fiabilidad del sistema de alimentación eléctrica de los servicios auxiliares de la planta.

3.2. Pregunta central de investigación

¿Cómo diseñar un plan de modernización y mantenimiento de la alimentación eléctrica de servicios propios para recuperar la fiabilidad de una planta hidroeléctrica de más de 50 años de antigüedad, considerando la criticidad y estrés de los equipos?

3.3. Preguntas orientadoras

- ¿Cuáles son las condiciones físicas de los equipos del sistema de distribución eléctrica y su entorno de instalación al momento del diseño del plan?
- ¿Cuál es la topología de la red y probabilidad de fallo?
- ¿Cuál es el orden de ejecución del plan en función de la criticidad y efectos al fallar un componente de la red?

4. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento de la demanda de energía por la población y la industria guatemalteca en la década de los años 1950 impulsó la planificación y construcción de proyectos de generación de energía eléctrica limpia, uno de esos proyectos emblemáticos para Guatemala es la planta hidroeléctrica Jurún Marinalá, que desde el año 1970 hasta la fecha continúa en funcionamiento con varios de sus equipos principales con desgaste físico y averías que ponen en riesgo al personal operativo y los activos de la planta, esta situación permite plantear un trabajo en la línea de investigación de técnicas adaptables para la innovación de materiales y equipos y su mantenimiento preventivo, perteneciente al área de diseño y conservación de materiales.

Con este trabajo se definirá un plan de modernización y mantenimiento de las instalaciones eléctricas de media y baja tensión de los servicios auxiliares de hidroeléctrica Jurún Marinalá, a partir de la filosofía de operación, la edad y el estado físico actual de los equipos que conforman esta parte del sistema.

Dentro del plan de modernización se propondrán tecnologías que puedan sustituir los equipos existentes de manera que durante la implementación el impacto en la misión de la hidroeléctrica sea mínimo, también se contemplará el aspecto de seguridad de las personas el cual en las nuevas normativas son más rigurosas.

El plan de mantenimiento se definirá a partir de la tecnología propuesta para la modernización, el índice de criticidad y estrés operacional al que será sometido para poder alargar el tiempo de vida útil de la instalación.

Los resultados de este trabajo y su implementación mejoraran la confiabilidad de los servicios auxiliares de la planta hidroeléctrica, aumentaran la posibilidad de seguir beneficiando a la economía nacional y a una gran parte de los guatemaltecos, porque con la energía generada por Hidroeléctrica Jurún Marinalá se contribuye al sostenimiento del aporte del INDE a la tarifa social de energía y a la electrificación del país, esto sumado a la contribución al medio ambiente propiciado por el mínimo impacto ecológico y como sustituta de fuentes de producción de energía contaminantes.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Diseñar un plan de modernización y mantenimiento de la distribución eléctrica de servicios auxiliares de planta hidroeléctrica Jurún Marinalá de potencia instalada 60MW con más de 50 años de operación mediante confiabilidad de redes eléctricas y evaluación de estrés operacional.

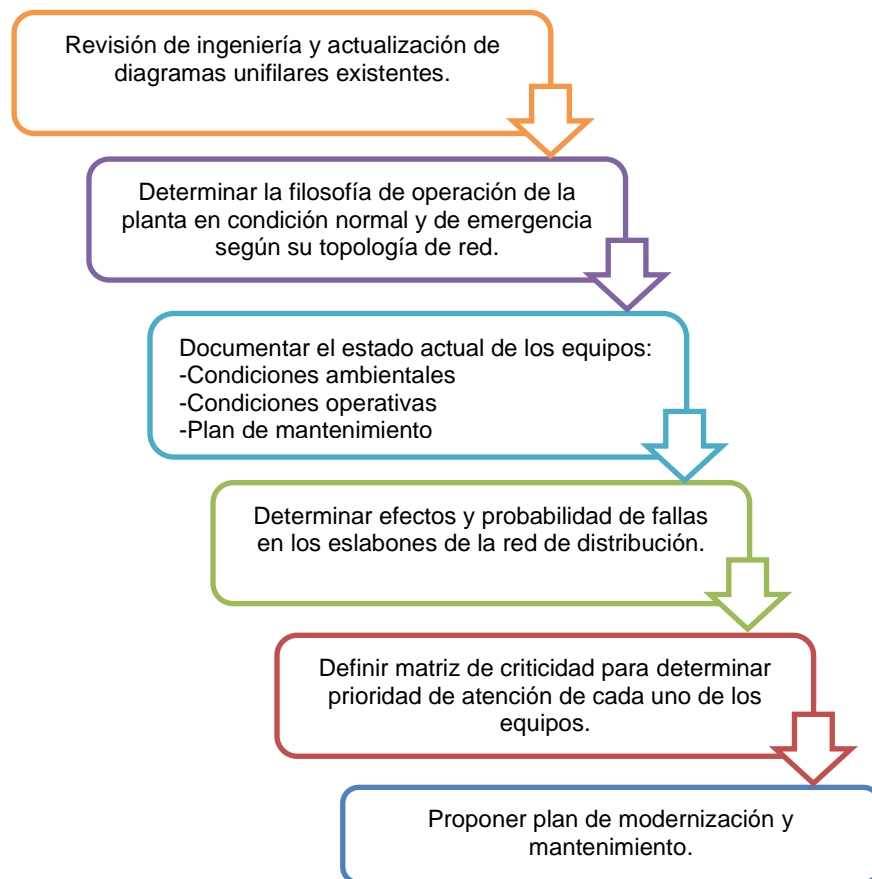
5.2. Específicos

- Establecer las condiciones físicas del equipo y su entorno de instalación en el momento del diseño del plan.
- Determinar la topología de la red de distribución eléctrica y los posibles puntos de mejora.
- Definir el orden de ejecución del plan de modernización y mantenimiento en función de criticidad y efectos al fallar un componente de la red.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Históricamente los ingenieros han tomado acciones para modernizar y mejorar la confiabilidad de instalaciones eléctricas existentes, enfocándose en aumentar la confiabilidad de la fuente de alimentación, esto es muy costoso y no tendrá un impacto significativo en las interrupciones del suministro derivadas de fallas internas. Por lo anterior un esquema de solución propuesto para considerar estas fallas es:

Figura 1. Esquema de solución



Fuente: elaboración propia.

El diagrama unifilar es una representación gráfica de una instalación eléctrica fácil de entender, en cualquier proyecto nuevo o de modernización es indispensable para saber la cantidad de equipos que componen el sistema eléctrico, sus características específicas y forma de interconectarse, para esta investigación es necesario validar el existente y de ser necesario actualizar cualquier cambio para su consideración en el plan de modernización.

Las instalaciones eléctricas tienen una filosofía de operación la cual está compuesta de varios escenarios que dependen de la topología de red, el proceso de fabricación u operación, el tipo de carga y de los medios para discriminarlas. Para esta investigación, los escenarios con las fuentes redundantes y de emergencia que alimentan los servicios que sirven para el control y protección de las unidades generadoras deberán ser analizados.

En el proceso de modernización y mantenimiento es necesario determinar el estado actual de los equipos derivado del lugar en el que están instalados, considerando temperatura, humedad, polución, vibración, entre otros., sumado a esto las condiciones operacionales del equipo tales como: voltaje, corriente, potencia, tamaño adecuado de equipo, número de operaciones, historial de mantenimiento, esta información es necesaria para definir si los equipos deben ser cambiados, reacondicionados o si únicamente requieren un mantenimiento específico.

El estado físico y las condiciones de operación de los equipos pueden dar indicios de los eslabones débiles de la cadena de distribución, existen métodos en los cuales se consideran estas variables para poder estimar la probabilidad de una falla y plantear los efectos de esta, como el tiempo de la reparación de la falla, las pérdidas generadas por el tiempo de reparación, el riesgo eléctrico en

el que el personal incurre, entre otros., esta información es importante para ponderar la necesidad de sustituir o no el elemento.

De los resultados del estado físico de los equipos y la probabilidad de falla se puede determinar un índice de criticidad del equipo que es necesario para generar un plan de modernización y mantenimiento ordenado, acorde a las necesidades inmediatas del sistema de distribución eléctrica y que no puede implementarse en un solo paso por temas presupuestales y operativos, el esquema de solución planteado puede aplicarse a sistemas de distribución industrial o comercial o como es el caso de esta investigación para subsistemas.

7. MARCO TEÓRICO

La condición física de los componentes del sistema de distribución eléctrica y la manera de operarlos están relacionados con su buen funcionamiento y es parte fundamental para la estabilidad y confiabilidad de cualquier sistema. Anteriormente ingenieros han tomado acciones para mejorar la confiabilidad de la distribución eléctrica enfocándose en aumentar las posibles fuentes de alimentación por medio de sistemas de respaldo, esto es muy costoso y no tendrá un impacto significativo en las interrupciones del suministro derivados de fallas internas del sistema.

Lo descrito anteriormente nos conduce a enfocar la atención en áreas críticas y la filosofía de operación de la instalación eléctrica, no solo en las fuentes de alimentación. Un análisis lógico de las opciones disponibles para la instalación eléctrica y un plan de mantenimiento para los dispositivos que la conforman nos llevara a una mejor confiabilidad al menor costo.

Un levantamiento de información exhaustivo y ordenado de un sistema eléctrico puede servir para identificar los componentes, partes de la red de distribución y subsistemas que tienen una confiabilidad inaceptable.

Según IEEE, (2016) algunas preguntas generales importantes aplicables en el proceso de mejora de confiabilidad de una instalación eléctrica son:

- ¿Cuál es la filosofía de operación de la instalación en el escenario normal y de contingencia?

- ¿Cuál es la edad y el estado físico general de los equipos y componentes de la instalación?
- ¿Está actualizada la documentación, como los diagramas unifilares, los estudios de corriente de cortocircuito y coordinación de protecciones de sobre corriente?
- ¿Cuál podría ser el efecto de una falla al ocurrir en cualquier punto del sistema sobre las cargas críticas?
- ¿Existe probabilidad de falla y que duración puede tener antes de ser reparada para cada uno de los componentes o partes del sistema?
- ¿Las cargas críticas, definidas como las necesarias para mantener la misión de la instalación, están separadas de otras cargas no tan críticas?
- ¿Existen otros peligros además del impacto de la misión, como incendios o seguridad de la vida, asociados con la interrupción del suministro eléctrico?
- ¿Qué duración de la interrupción del suministro eléctrico afectará la misión de la instalación y cuál es el costo de ese impacto?
- ¿Se han implementado las políticas y los procedimientos de operación y mantenimiento adecuados para respaldar el logro de la confiabilidad diseñada del sistema?

Dar respuesta a estas preguntas y actuar correctamente sobre las respuestas pueden mejorar la confiabilidad implementando un plan de modernización y mantenimiento de equipos dependiendo del estado actual y su criticidad.

7.1. Ingeniería y diseño

Durante el proceso de planificación y diseño de una instalación eléctrica para distribuir energía, se realiza un completo análisis para evaluar el desempeño que tendrá durante su operación, mantenimiento y futuros cambios por expansión

del sistema, esto contempla cálculo de flujo de carga y nivel de tensión en el escenario de funcionamiento normal y emergencia, así como el comportamiento transitorio durante una falla y capacidad de cortocircuito.

Los estudios que sirven de gran manera en la etapa de diseño, expansión o modernización de un sistema son:

- Flujo de carga
- Ampacidad de conductores
- Corto circuito
- Coordinación y selectividad de protecciones

De forma complementaria pueden necesitarse los estudios de:

- Confiabilidad
- Puesta a tierra
- Armónicos
- Arco eléctrico

La información obtenida de estos estudios puede emplearse para especificar las características técnicas de los equipos que serán necesarios para la nueva instalación o la modernización de una existente.

7.1.1. Dibujos

En esta parte del diseño se requiere información de fabricantes de equipos, para definir la tecnología que se empleara y las dimensiones que tendrán los equipos que cumplen con las características definidas en los estudios eléctricos y con ello poder definir en los dibujos arquitectónicos de planta la ubicación del cuarto eléctrico, su tamaño y la disposición de equipos dentro de él.

En esta parte se debe enfatizar la necesidad de espacios para la instalación de bandejas para la instalación de cables, refuerzo estructural o bases para equipos, espacios de trabajo de los equipos que componen la subestación y otros elementos que puedan ser necesarios, incluso contemplar que a futuro podría necesitarse instalar o eliminar equipos.

Para el caso específico de modernización o cambio de equipo existente, podría ser necesaria reubicación de maquinarias, rutas de cableados existentes, entre otros., por eso es inevitable contemplar el proceso de levantamiento de información en campo y analizar los planos constructivos, historial operativo y condiciones actuales del sitio a modernizar.

7.1.2. Información de equipos existentes

Cuando las instalaciones por modernizar son demasiado antiguas, es necesario revisar si la nueva tecnología se acoplara al sistema de control existente, protocolos de comunicación, señales de campo, operatividad, esquema de protecciones, entre otros, por lo anterior se debe revisar exhaustivamente la información del sistema existente, por ejemplo:

- Esquemas o diagramas de control.
- Esquemas o diagramas unifilares.
- Características específicas de los equipos.
- Ensamblajes mecánicos.
- Normas de fabricación.

Cuando esta información no se encuentra documentada por cualquier circunstancia, debe contemplarse un levantamiento de información en campo,

utilizando protocolos de seguridad eléctrica y herramientas básicas a través de una metodología de inspección visual y documentación fotográfica.

7.1.3. Diagramas unifilares

El diagrama unifilar de una instalación eléctrica debe representar de forma sencilla los elementos que componen el sistema y la forma de interconexión, normalmente tienen una estructura radial y contienen los datos más importantes de cada elemento.

7.1.3.1. Información requerida

Entre los datos principales que deben indicarse en un diagrama unifilar que se empleara para plantear una modernización de la instalación, estudios eléctricos o únicamente como esquema informativo de una instalación son:

- Punto de interconexión a la red.
- Equipos de respaldo o auxiliares de generación.
- Datos de cargas, principalmente motoras.
- Datos de equipos tales como: transformadores, centros de carga, cables, interruptores, centros de control de motores (CCM), reactores y capacitores.

Para cada equipo es importante contener como mínimo la información listada en las tablas siguientes.

Para transformadores de potencia, distribución o servicios auxiliares:

Tabla I. **Transformadores**

Ítem	Datos
1	Tipo de Conexión
2	Tipo de enfriamiento
3	Toma en uso
4	Numero de tomas
5	Potencia nominal
6	Voltaje primario y secundario
7	Valor de impedancia
8	Corriente de magnetización
9	Relación X/R
10	Medio de puesta a tierra
11	Valor de resistencia o reactancia de puesta a tierra
12	Fecha de fabricación

Fuente: elaboración propia.

Para tableros de distribución compartimentados y CCM de media tensión, tableros compartimentados, centros de carga y CCM de baja tensión.

Tabla II. **Tableros de potencia y CCM**

Ítem	Datos
1	Marca
2	Catálogo
3	Corriente nominal
4	Voltaje nominal
5	Máxima capacidad de Corto Circuito
6	Fecha de fabricación

Fuente: elaboración propia.

Interruptores de distintas tecnologías de corte de arco y aislamiento.

Tabla III. **Interruptores**

Ítem	Datos
1	Marca
2	Catálogo
3	Corriente nominal
4	Ajuste de unidad de disparo
5	Máxima capacidad interruptiva
6	Máxima capacidad de corto circuito
7	Fecha de fabricación
8	Para interruptores de media tensión se deben obtener características del relevador de protección asociado

Fuente: elaboración propia.

Relevadores de protección de distribución, de motor, de transformador, generador u otros.

Tabla IV. **Relé de protección**

Ítem	Datos
1	Marca
2	Catálogo
3	Relación de transformación de corriente de fase
4	Ajuste de tiempo largo
5	Ajuste de tiempo corto
6	Ajuste de corriente instantáneo
7	Ajuste de retardo de tiempo largo
8	Ajuste de retardo de tiempo corto
9	Ajuste de retardo instantáneo

Fuente: elaboración propia.

Interruptores termomagnéticos de caja moldeada, de falla a tierra, interruptores de potencia.

Tabla V. **Interruptores de baja tensión**

Ítem	Datos
1	Marca
2	Catálogo
3	Corriente nominal
4	Ajuste de unidad de disparo
5	Máxima capacidad interruptiva
6	Máxima capacidad de Corto Circuito
7	Unidad de disparo
8	Sensor
9	Plug
7	Fecha de fabricación

Fuente: elaboración propia.

Cableados de media tensión, líneas de distribución aéreas, electroducto, cableado de baja tensión.

Tabla VI. **Cableados**

Ítem	Datos
1	Calibre de conductores de las fases (AWG/mm ²)
2	Tamaño de los conductores de neutro
3	Tamaño de los conductores de tierra
4	Temperatura de operación
5	Longitud del circuito
6	Tipo de aislamiento
7	Material del conductor
8	Número de conductores por fase
9	Número de conductores por canalización
10	Tipo de canalización
11	Material de canalización

Fuente: elaboración propia.

Motores síncronos o asíncronos con capacidad mayor a 50 HP y todos los motores de media tensión, para motores de baja tensión inferior a 50 HP se

pueden agrupar en motores de la misma capacidad documentando la potencia resultante de la sumatoria.

Tabla VII. **Motores**

Ítem	Datos
1	Marca
2	Catálogo
3	Tipo de motor
4	Tensión nominal
5	Capacidad del motor en HP
6	Factor de potencia
7	Eficiencia
8	Número de polos
9	Reactancia subtransitoria
10	Tipo de arranque

Fuente: elaboración propia.

Generadores impulsados por algún tipo de fuerza motriz que son parte de la instalación en escenario de funcionamiento normal o de emergencia.

Tabla VIII. **Generadores**

Ítem	Datos
1	Marca
2	Catálogo
3	Capacidad del generador en kW
4	Tensión nominal
5	Factor de potencia
6	Número de polos
8	Reactancia y tiempo subtransitorio
9	Reactancia y tiempo transitoria
10	Reactancia y tiempo síncrono

Fuente: elaboración propia.

Sistemas de iluminación y fuerza, alimentación de servicios auxiliares en CA y CC.

Tabla IX. **Cargas no motoras**

Ítem	Datos
1	Potencia nominal en kW
2	Tensión nominal
3	Factor de potencia

Fuente: elaboración propia.

Sistemas de compensación de reactiva.

Tabla X. **Banco de capacitores**

Ítem	Datos
1	Marca
2	Catálogo
3	Tipo de banco
4	Conexión automática o manual
5	Numero de pasos
6	Capacidad en kVAR
7	Resistencia, reactancia y capacitancia

Fuente: elaboración propia.

7.1.3.2. Equipo para levantamiento de campo

Para realizar el levantamiento de información en campo en cualquier instalación eléctrica es necesario cumplir con los programas de seguridad industrial de cada sitio, el acompañamiento de un técnico o ingeniero que conozca la instalación ayudara a agilizar este procedimiento y obtener información relevante de la operatividad del sistema, el uso de ropa ignifuga y herramienta aislada debe ser considerado, se requiere como mínimo de la siguiente herramienta y equipos:

Tabla XI. **Herramientas y equipo**

Ítem	Descripción
1	Equipo de Protección Personal (EPP)
2	Tablas de levantamiento de datos
3	Pinza amperométrica
4	Detector de tensión por proximidad
5	Lámpara de mano
6	Flexómetro
7	Vernier plástico
8	Cámara digital fotográfica

Fuente: elaboración propia.

7.1.4. Corrientes de corto circuito

Con este estudio se calculan las magnitudes de las corrientes que circularán al momento en que se genere una falla en algún lugar o componente de la instalación eléctrica, los valores obtenidos son utilizados para definir la clasificación del equipamiento para la distribución de energía, seleccionar fusibles e interruptores y parametrizar los relés de protección.

Anteriormente los cálculos se realizaban de forma manual, sin embargo, la velocidad y confiabilidad de los cálculos que actualmente proveen las computadoras con el uso de software especializado ha hecho que los ingenieros opten por su uso incluso para redes pequeñas.

7.1.4.1. Modelado de instalación eléctrica

Existen muchos fabricantes de software para el modelado de instalaciones eléctricas, algunos especializados en redes de transmisión y otros en redes de distribución. Estas aplicaciones cuentan con librerías precargadas de elementos que normalmente componen una red eléctrica, estos elementos se clasifican en

elementos pasivos, siendo parte de estos las líneas de transmisión, transformadores, capacitores y reactores que se consideran lineales y que se modelan mediante valores de resistencia, inductancia y capacitancia.

Elementos activos por ejemplo motores, generadores, hornos, variadores de velocidad, entre otros., los cuales son no lineales y que al modelarlos varían en función del tiempo, frecuencia, velocidad o ángulo de fase, el modelado de estos elementos puede reducirse al uso de los valores de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia con sus respectivas ecuaciones que las relacionan.

No se profundizará en este tema, al no ser un objetivo de la investigación, si el lector desea conocer más al respecto encontrará varias relaciones fundamentales de magnitudes eléctricas y mecánicas que sirven para realizar los modelos matemáticos de los componentes eléctricos empleados en la mayoría de las aplicaciones en el capítulo 4 de (IEEE, 1998).

7.1.4.2. Cálculo de corriente de falla

IEEE, (1994) Las corrientes que circulan durante un cortocircuito provienen principalmente del aporte de la compañía suministradora y de equipo eléctrico giratorio, por ejemplo:

- Generadores síncronos
- Motores síncronos
- Máquinas de inducción
- Motores de inducción de CA y CC con variadores de velocidad de estado sólido.

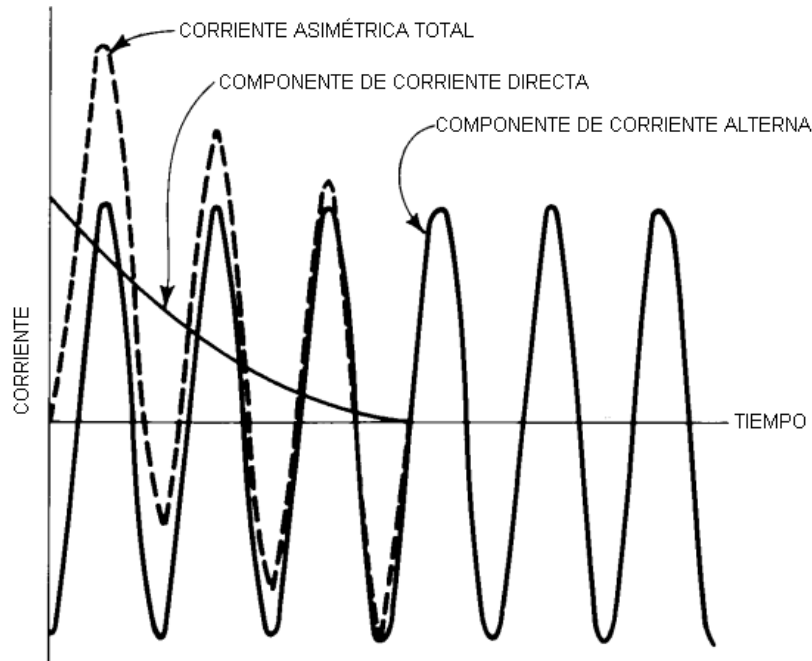
En el cálculo de las corrientes de falla se emplea la ley de Ohm, $I = E / Z$, donde E es el voltaje de fuente y Z es la impedancia desde la fuente hasta el sitio de la falla, incluida las impedancias localizadas en la ruta de la corriente de cortocircuito, en un sistema se requiere hacer el modelo electrónico considerando los alimentadores los cuales contribuyen al cortocircuito y las impedancias de los equipos activos y pasivos que ayudan a atenuar el efecto del cortocircuito.

En general el cálculo de las corrientes de falla se realiza simplificando la impedancia del sistema hasta tener una impedancia equivalente en el lugar de la falla (Z_{eq}) y considera una tensión equivalente (E_{eq}). Para todo esto se aplican los teoremas eléctricos y técnicas de simplificación de circuitos eléctricos (Thevenin, matricial y método comprensivo) por unidad. El valor de corriente calculado con la relación E_{eq}/Z_{eq} en el circuito bajo análisis es la corriente de cortocircuito o corriente de falla.

Existen algunos equipos que pueden contribuir al cortocircuito en un punto de la red debido a su principio de operación tal es el caso de los motores de inducción. Durante los primeros ciclos después de ocurrida la falla los motores que se encuentran en operación actúan como generadores debido a la inercia del rotor incluyendo la carga que arrastra.

El fenómeno de distorsión o asimetría debida a las reactancias y motores instalados en el sistema se puede apreciar en la siguiente gráfica:

Figura 2. **Corriente de falla típica**



Fuente: IEEE. (1994). *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*.

Por lo tanto, los métodos de cálculo deben considerar el efecto de la asimetría. La corrección para compensar la asimetría considera que la corriente de falla está compuesta por dos componentes: la componente simétrica de corriente alterna E/Z y una componente llamada de corriente directa que inicialmente tiene un valor máximo por lo que genera un importante pico en la onda compuesta. El tamaño de la componente de corriente directa tiene un decremento con el tiempo y depende de la reactancia y la resistencia equivalentes en el punto de falla, mejor conocida como relación X/R .

La corriente del primer ciclo es muy importante ya que como se puede apreciar en la figura No. 2 durante el primer medio ciclo se presenta un pico de corriente que puede superar la capacidad de los dispositivos y equipos causando

la destrucción. Así mismo es de gran importancia conocer el valor de X/R debido a que de esta relación depende la magnitud máxima de la falla.

El estándar IEEE, (1994) recomienda la elaboración de tres escenarios de análisis para los cálculos de las corrientes de falla. La diferencia entre cada red es el valor de la impedancia de las máquinas rotatorias.

Las principales aplicaciones de las tres redes de impedancia comúnmente analizadas son:

- Capacidades de primer ciclo para fusibles e interruptores (Reporte de falla momentánea). Para el ajuste de protecciones de tipo instantáneo, especificación de fusibles e interruptores, verificar la capacidad de cierre de interruptores en alta tensión, así como definir la capacidad de soportar una falla de tableros y electroductos se debe utilizar el valor de la corriente de falla determinada por el escenario del primer ciclo.
- Capacidades interruptiva de interruptores tanto en alta como en media tensión (reporte de falla interruptiva 2, 3, 5 ciclos). La máxima corriente cuando el interruptor abre sus contactos debe ser verificada comparándola con la corriente calculada de falla presente en el lapso de 1 a 6 ciclos.
- Corrientes de cortocircuito para dispositivos de protección con retardo de tiempo (reporte de falla 30 ciclos). Para una aplicación de protecciones con acción retardada a más de 6 ciclos, en ese escenario normalmente solo se incluyen generadores y elementos pasivos tales como transformadores y cables entre el punto de falla y generadores. Los generadores son representados por su impedancia transitoria. La contribución de motores se omite. Solamente los generadores que contribuyen a las corrientes de cortocircuito en el relevador que se encuentra bajo estudio se consideran para el análisis. La componente de CC habrá disminuido cercana a cero y

no se debe de considerar. La corriente rms de falla simétrica es $E_{p.u.}/X_{p.u.}$ donde $X_{p.u.}$ se deriva de la reactancia equivalente compuesta de Equipos pasivos (transformadores, cables, entre otros.) u generadores en las rutas de protección.

7.2. Sistema eléctrico

Existen diversas configuraciones de las instalaciones eléctricas, durante la fase de diseño se debe escoger el que mejor se acople al requerimiento del proceso o necesidad, el costo de su implementación aumenta según la confiabilidad y la calidad de los componentes. Se puede lograr la máxima confiabilidad por unidad de inversión mediante el uso de componentes bien diseñados y aplicados correctamente.

7.2.1. Sistema de distribución

El primer paso es el análisis del proceso de la planta para determinar su necesidad de confiabilidad, posibles pérdidas y costos en caso de una interrupción del suministro eléctrico. Algunos procesos se ven mínimamente afectados por la interrupción. En este caso, un sistema radial simple puede resultar satisfactorio. Otros procesos pueden sufrir daños a largo plazo o experimentar un costo excesivo incluso por una breve interrupción, por lo tanto, un sistema más complejo con una fuente de energía alternativa para cargas críticas puede estar justificado.

La redundancia de circuitos puede ser necesaria en algunos procesos continuos para permitir el mantenimiento de equipos. Aunque la confiabilidad de los equipos de distribución de energía eléctrica es alta, la confiabilidad óptima y la seguridad de operación aún requieren un mantenimiento de rutina. Un sistema

que no se puede mantener debido a la necesidad de servir a un proceso continuo está mal diseñado.

Se puede lograr mucho más con la selección adecuada de la disposición del circuito que economizando en los detalles del equipo. Las reducciones de costos nunca deben realizarse a costa de la seguridad y el rendimiento mediante el uso de aparatos inferiores. Las reducciones deben obtenerse mediante el uso de un sistema de distribución menos costoso con cierto sacrificio en la capacidad de reserva y confiabilidad.

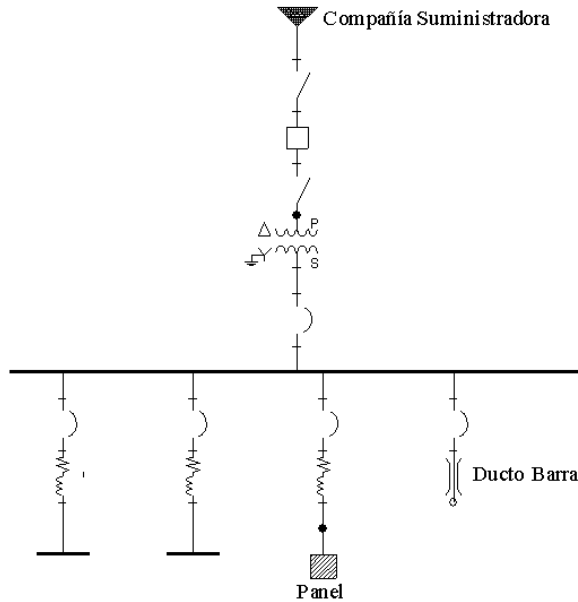
7.2.1.1. Sistema radial simple

En este tipo de sistemas únicamente existe un alimentador y un transformador de distribución, no se cuenta con ningún sistema de respaldo o redundancia, esta configuración de red es la más económica de todas.

Su funcionamiento y la expansión son sencillos, su confiabilidad es alta cuando se emplean equipos de alta calidad, ante el fallo de un conductor, el suministro de energía o el transformador, el servicio se interrumpe por completo.

Para el mantenimiento todo el equipo debe apagarse, por lo que el sistema es satisfactorio para instalaciones donde el proceso permite suficiente tiempo de inactividad para el mantenimiento.

Figura 3. **Sistema radial simple**



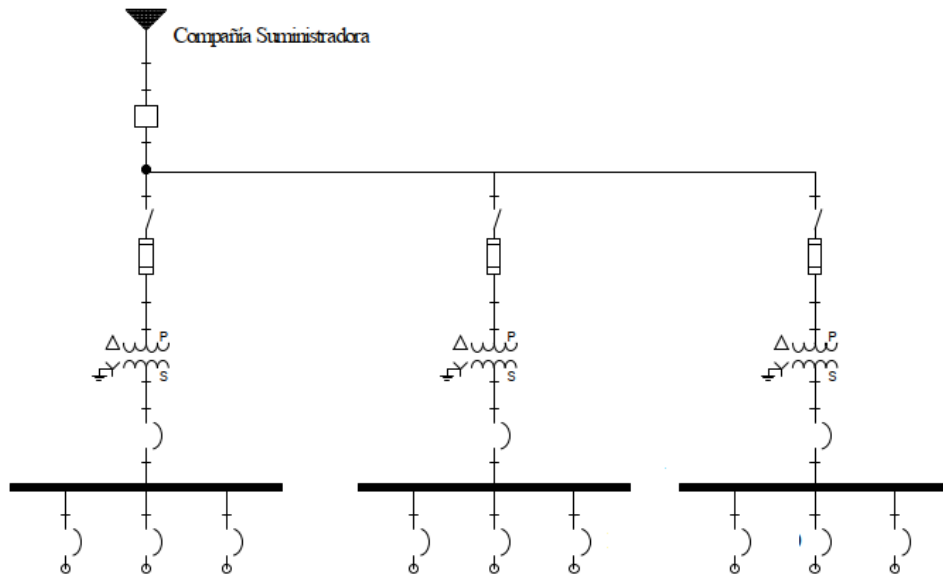
Fuente: elaboración propia, utilizando software SKM Power Tools.

7.2.1.2. Sistema radial expandido

Se le llama a la configuración en la que desde el alimentador se derivan más subestaciones unitarias para formar varios sistemas radiales, la confiabilidad se incrementa al aumentar el número de subestaciones, en esta configuración al perder un transformador las otras subestaciones mantienen la alimentación de las cargas, y para minimizar el efecto de caída de voltaje las subestaciones adicionales se ubican cerca de la carga.

Las ventajas y desventajas son las mismas que las descritas para el sistema radial.

Figura 4. **Sistema radial expandido**



Fuente: elaboración propia, utilizando software SKM Power Tools.

7.2.1.3. Sistema selectivo primario

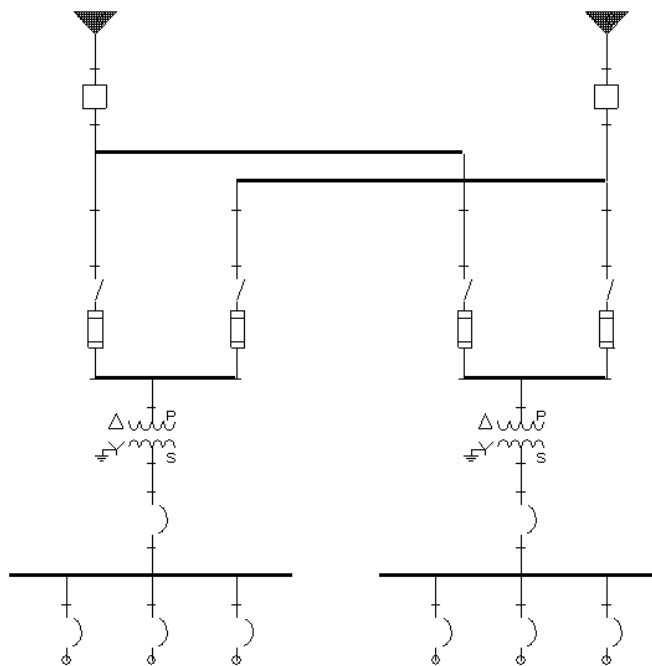
Cuando existe la posibilidad de poder tener dos fuentes de suministro primario cada subestación está conectado a estas fuentes por medio de un equipo de conmutación para proporcionar una fuente normal y una alternativa. En caso de fallar la fuente normal, el transformador de distribución se conmuta a la fuente alternativa de una forma manual o automática, durante esta maniobra hay una interrupción hasta que la carga es transferida a la fuente alternativa.

El costo es más alto que un sistema radial debido a la duplicación del cable primario y el equipo selector primario.

7.2.1.4. Sistema de lazo primario

Este sistema provee una mayor confiabilidad y continuidad el servicio comparado con el radial ya que la energía es suministrada continuamente desde dos fuentes en los extremos del lazo, un sistema de este tipo si se diseña y opera de forma correcta puede recuperarse rápidamente de una falla de una de sus fuentes.

Figura 5. Sistema selectivo primario



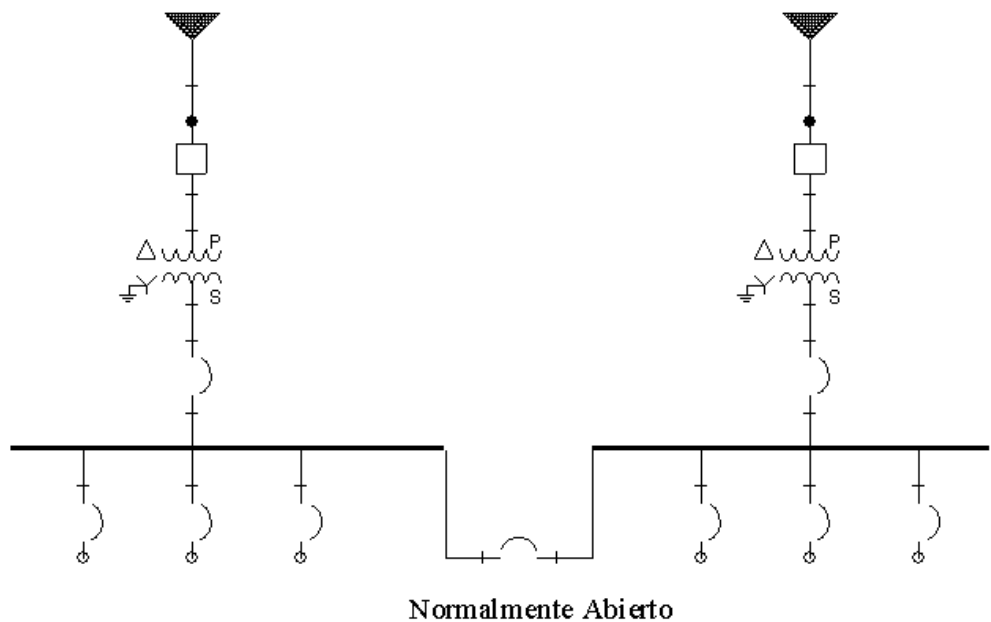
Fuente: elaboración propia, utilizando software SKM Power Tools.

Una característica importante de los sistemas de lazo es que una sección de cable puede aislarse del lazo para repararlo o realizarle mantenimiento mientras la otra parte del sistema aún funciona.

7.2.1.5. Sistema selectivo secundario

Cuando dos subestaciones se pueden conectar a través de un interruptor secundario o "TIE" el resultado es un escenario con selectividad en el secundario. Si un transformador primario falla, el suministro se mantiene a través del interruptor secundario.

Figura 6. Sistema selectivo secundario



Fuente: elaboración propia, utilizando software SKM Power Tools.

Normalmente, los sistemas funcionan como sistemas radiales. El mantenimiento de los alimentadores primarios, el transformador y los medios de desconexión secundarios principales es posible con solo una interrupción momentánea de la energía, o sin interrupción si las subestaciones se pueden operar en paralelo durante la conmutación, aunque el mantenimiento completo de la estación requerirá ser apagado.

Con la pérdida de un circuito primario o transformador, la carga total de la subestación puede ser suministrada por un transformador. Para tener en cuenta esta condición, se debe considerar lo siguiente:

- Sobre dimensionar los dos transformadores de tal forma que un transformador pueda soportar la carga total.
- Suministro de refrigeración por aire forzado al transformador en servicio durante el período de emergencia.
- Discriminación de cargas no esenciales durante el período de emergencia.

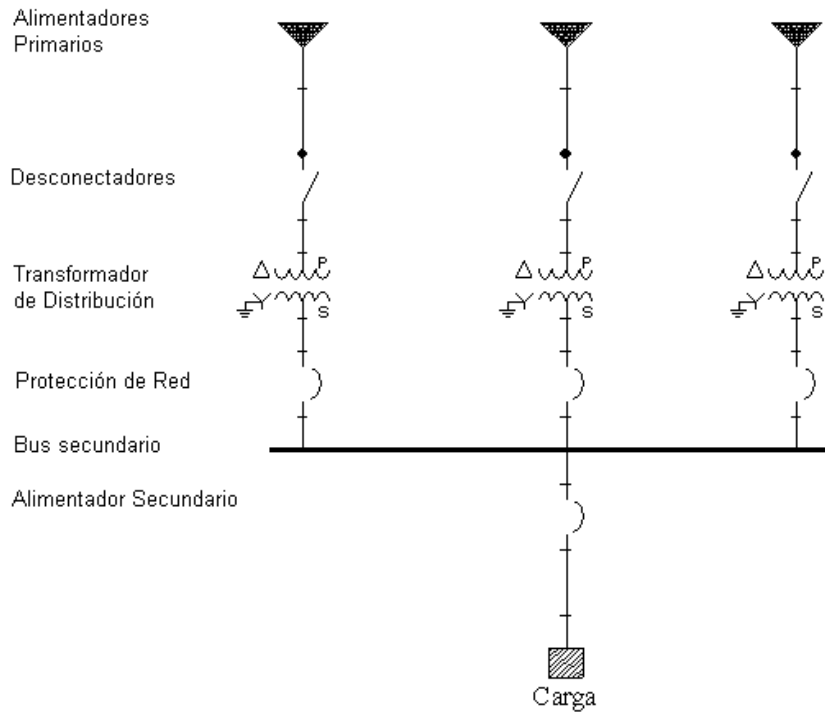
7.2.1.6. Red secundaria spot

En este sistema dos o más transformadores de distribución se alimentan cada uno de un alimentador de distribución primario independiente. Los secundarios de los transformadores están conectados en paralelo a través de un dispositivo especial, llamado protector de red, a un bus secundario.

Si falla un alimentador primario o un transformador de distribución, puede seleccionarse uno de los transformadores restantes para alimentar la carga, este tipo de red es la fuente de alimentación más confiable para grandes cargas. Una interrupción de energía solo puede ocurrir cuando hay una falla simultánea de todos los alimentadores primarios o cuando existe una falla en el bus secundario.

Este sistema es caro debido al costo de los equipos secundarios y requiere una construcción de bus especial para reducir el potencial de subida de la falla por arco eléctrico.

Figura 7. Sistema selectivo secundario



Fuente: elaboración propia, utilizando software SKM Power Tools.

7.2.2. Sistemas de emergencia

Como se menciona en IEEE, (1996) existen dos sistemas básicos de de energía de emergencia:

- Una fuente de energía eléctrica separada de la fuente principal, que opera en paralelo y que mantiene la energía para las cargas críticas en caso de que falle la fuente principal.
- Una fuente de energía confiable disponible a la que las cargas críticas se conmutan rápida y automáticamente cuando falla la fuente principal de energía.

Los sistemas de energía de emergencia están compuestos de los siguientes componentes principales:

- Una fuente alternativa confiable de energía eléctrica separada de la fuente de energía principal.
- Un controlador que encienda la fuente alternativa y regule, al momento de seleccionar la generación en reserva como fuente.
- Un control que transfiera sus cargas de la alimentación principal o de emergencia a la fuente de reserva.

7.2.2.1. Sistemas redundantes

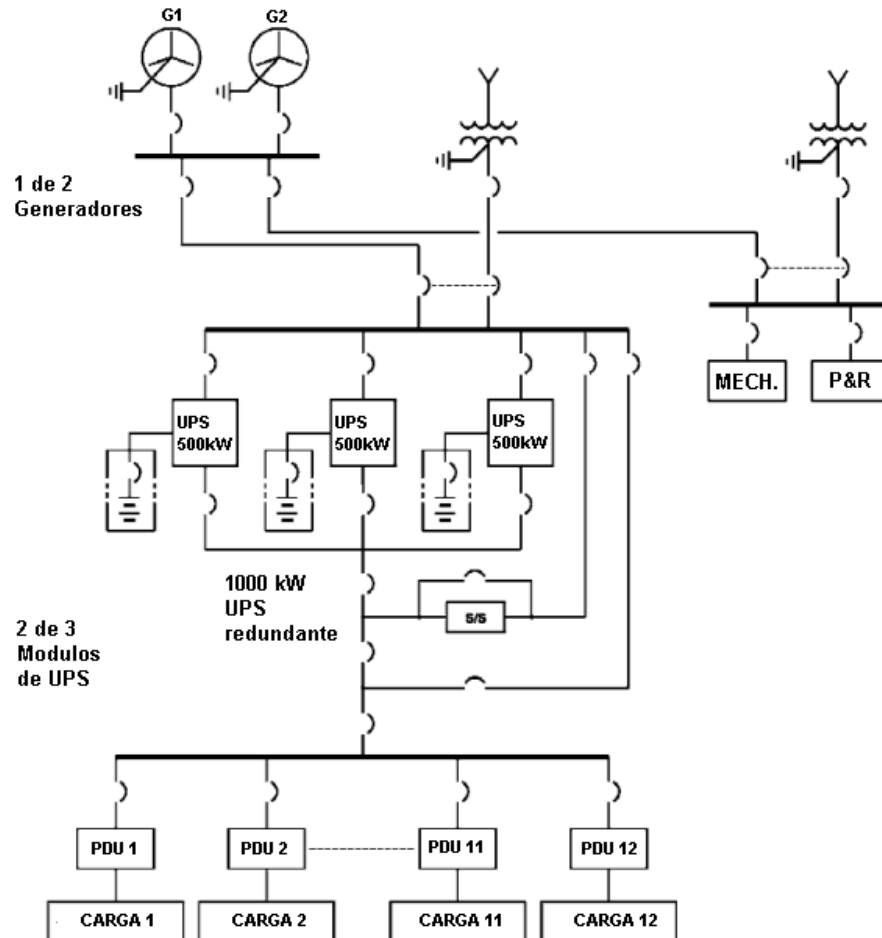
Un sistema común de muchos sistemas de distribución críticos es la redundancia, hay más componentes clave de los necesarios para soportar la carga total de una instalación. Los dos componentes clave más comunes que tienen redundancia son los sistemas de UPS y los generadores de emergencia.

En IEEE, (2007) cuando se habla de la redundancia de un sistema, es común referirse a lo que se requiere como “N” para el número de redundancias. Si una instalación tiene dos generadores de reserva y ambos deben soportar la carga del recinto durante un corte de energía, N es dos. Si se agrega un tercer generador, la redundancia del sistema de generación de energía se convertiría en “N+1”. También habría un 50 % de redundancia en la energía del generador de reserva.

Si la instalación tiene dos generadores de reserva y solo se requiere uno, la redundancia también se llamaría N+1. Esto también podría llamarse “2N”, para mostrar que hay un 100 % de redundancia en la energía del generador de reserva. Depende de cómo estén configurados los generadores para determinar

que termino se prefiere. Si son totalmente independientes entre sí la redundancia es 2N.

Figura 8. **N+1 generadores y módulos de UPS**



Fuente: IEEE. (2007). *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems.*

En la anterior figura se muestran dos generadores que se conectan a un tablero de distribución de generadores en paralelo que proporciona energía de respaldo a un sistema de distribución crítico. Hay tres módulos UPS conectados en una configuración redundante en paralelo, con un interruptor de bypass estático en un centro de distribución único. Este sistema se llamaría N + 1, ya

que solo hay un cuadro de distribución en paralelo de generador y un sistema UPS.

En un sistema 2N, hay dos sistemas idénticos y solo se requiere uno para transportar la carga. Para esta investigación es necesario entender cómo se componen los sistemas redundantes y considerarlos en la modernización planteada como objetivo.

7.2.2.2. Generadores de emergencia

Son maquinas que satisfacen la necesidad de energía de emergencia y de reserva, están disponibles desde unidades de 1KVA hasta varios miles de kVA, se ponen en funcionamiento de forma fiable en un plazo de 8 a 15 segundos, los generadores accionados por motor se pueden clasificar como sigue.

Tabla XII. **Clasificaciones de generadores impulsados por motor**

Potencia Nominal	Potencia principal	Potencia en espera	Factor de potencia	Fuerza motriz			Velocidad (r/min)
				Gasolina	Diesel	Gas natural	
5				X	X	X	3600
10	10	10	1.0	X	X	X	1800
25	25	30	0.8	X	X	X	1800
100	90	100	0.8	X	X	X	1800
250	225	250	0.8	X	X	X	1800
750	665	750	0.8	X	X	X	1800
1000	875	1000	0.8	X	X	X	1800

Fuente: IEEE. (1996). *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications.*

7.2.2.3. Transferencia eléctrica

Una transferencia eléctrica puede constar de dos interruptores con enclavamientos eléctricos o mecánicos y un control para transferir la carga automáticamente a cualquier fuente si la otra falla, siempre que ese circuito esté energizado. Normalmente se designa la fuente para uso normal a la interconexión con la compañía suministradora y al generador como fuente de emergencia. Si alguno de los suministros no puede transportar toda la carga, se deben tomar las medidas necesarias para eliminar las cargas no críticas antes de que se lleve a cabo la transferencia.

El funcionamiento adecuado de la transferencia es una parte vital del funcionamiento adecuado del sistema, en la parte de diseño la clasificación de la corriente de falla juega un papel importante en su aplicación y esquema de protección. Debe ser capaz de cerrarse con corrientes altas, de resistir corrientes de falla y un ciclo de trabajo severo en la conmutación de carga nominal.

Las altas corrientes pueden generar efectos dañinos para los equipos los cuales se pueden dividir en dos tipos de fenómenos: la tensión magnética que intentan abrir los contactos del interruptor o doblar las barras y la energía térmica desarrollada que puede derretir, deformar o dañar el interruptor. Cualquiera de estos componentes puede provocar una falla en el interruptor.

7.2.3. Filosofía de operación

Una instalación eléctrica se compone de varios equipos para poder alimentar de forma segura y confiable una cantidad determinada de cargas, en diferentes niveles de voltaje, localizadas normalmente en distintas partes del recinto industrial, comercial o vivienda. La secuencia de las operaciones y

maniobras que se realizan en los equipos para cumplir con el cometido del sistema de distribución se le conoce como la filosofía de operación, esta filosofía es importante para determinar los distintos escenarios de funcionamiento de la instalación en estado normal o emergencia.

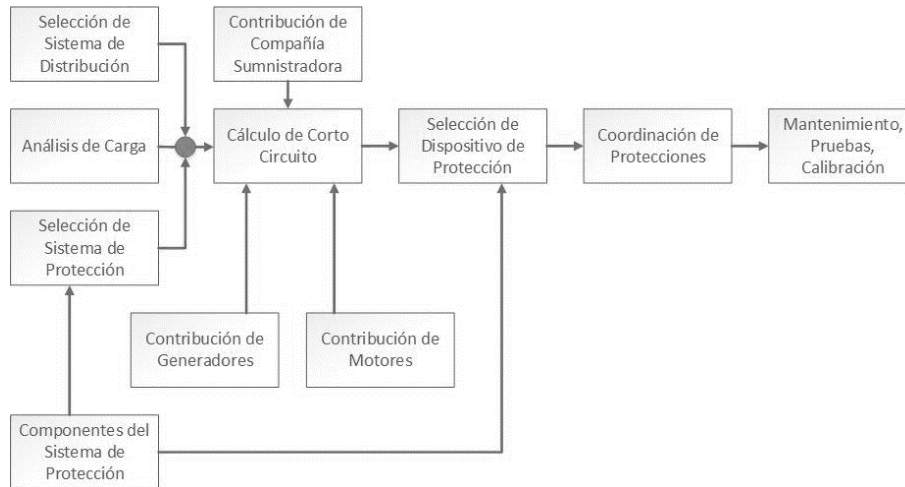
7.2.4. Protecciones eléctricas

Las protecciones eléctricas son dispositivos que responden al estado de una o varias entradas de una forma precisa y después de que se cumplen unas condiciones definidas para provocar la operación de un contacto en un control eléctrico asociado, las variables de entrada pueden ser eléctricas, mecánicas, térmicas u otras.

Para diseñar un sistema de protección es necesario determinar los tipos de cargas, tamaño y requisitos especiales para su buen funcionamiento, el estándar IEEE, (2001) propone una secuencia de pasos para poder implementar un sistema de protecciones, estos se describen en la figura 9.

A las diversas funciones del relé de protección se les ha asignado un número para su identificación. Todos estos números se enumeran en IEEE, (2008) y se utilizan en diagramas, libros de instrucciones y especificaciones. En la tabla XIII se enumeran los que se usan con más frecuencia, junto con la función que representa cada número.

Figura 9. Pasos para el diseño de protecciones y coordinación



Fuente: IEEE. (2001). *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems.*

Tabla XIII. Lista de funciones de relevadores de uso común

Número de función del dispositivo de protección	Función de protección
21	Distancia
25	Sincronización
27	Bajo voltaje
32	Direccional de potencia
40	Perdida de excitación
46	Equilibrio de fase
47	Tensión para secuencia de fase
49	Térmico
50	Instantáneo de sobre corriente
51	Sobre corriente temporizada
59	Sobre voltaje
60	Equilibrio de voltaje
67	Direccional sobre corriente
81	Frecuencia
86	Enclavamiento
87	Diferencial

Fuente: IEEE. (2008). *IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations.*

Los números pueden acompañarse normalmente de una letra que denota el elemento del circuito que se está protegiendo o la aplicación.

Tabla XIV. **Sufijos aplicados al número de función de relevadores**

Letra sufija	Aplicación
A	Solo alarma
B	Protección de bus
G	Protección de generador
GS	Protección de falla a tierra
L	Protección de línea
M	Protección de motor
N	Protección de falla atierra
T	Protección de transformador
V	Voltaje

Fuente: IEEE. (2008). *IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations.*

7.2.4.1. Coordinación de protecciones

Con el estudio de selectividad y coordinación de protecciones podemos definir la parametrización de los relevadores y las características de los equipos a utilizar. Estos dispositivos se aplican de tal forma que, ante una condición de falla o sobrecarga, solo se interrumpe una parte mínima del sistema de energía.

Este estudio debe incluir todos los dispositivos desde el equipo de utilización hasta la fuente por medio de rutas y zonas de protección.

Entre otros datos el estudio puede entregar los siguientes datos:

- Relaciones de transformadores de instrumentos
- Características y ajustes del relé de protección

- Características y clasificaciones de los fusibles
- Valores nominales, características y configuraciones de los interruptores de bajo voltaje.

IEEE, (2001) Al aplicar dispositivos de protección, en ocasiones es necesario hacer un compromiso entre protección y selectividad. Si bien la experiencia puede sugerir una alternativa sobre otra, el enfoque preferido es favorecer la protección sobre la selectividad. Sin embargo, la elección que se haga depende del daño del equipo y del efecto en el proceso.

En las instalaciones existentes, las configuraciones del sistema y las condiciones operativas a menudo cambian. Se debe realizar un nuevo estudio de coordinación cuando cambia la corriente de falla disponible en una planta o cuando ocurren cambios significativos en los cuadros de carga del sistema. Este estudio determina las clasificaciones o los ajustes necesarios para garantizar que la selectividad y la protección se mantengan después de que se produzcan cambios en el sistema.

Definitivamente, se debe realizar un estudio de coordinación cuando una falla es cercana al sistema y genera un apagón inesperadamente de parte importante del sistema. Un evento de este tipo puede indicar el requerimiento de restablecer o cambiar dispositivos.

7.3. Evaluación de equipos

Una inspección minuciosa de la condición física de los equipos de un sistema de distribución puede ayudar a mejorar la confiabilidad, los equipos que atienden cargas o procesos críticos deben ser parte de un programa integral de mantenimiento preventivo y predictivo, que normalmente combina inspecciones

visuales periódicas de los equipos con pruebas mecánica y eléctricas para identificar y corregir las condiciones de deterioro antes que provoque cortes no programados.

Los beneficios de estas inspecciones y pruebas son:

- Identificación inmediata de condiciones que puedan ocasionar fallas en el corto plazo.
- Una indicación de las condiciones generales de mantenimiento del sistema que se puede usar en los cálculos de confiabilidad para seleccionar los multiplicadores de la tasa de fallos.
- Establecer valores de prueba de línea base que se pueden usar para iniciar el monitoreo de tendencias como parte de un programa de mantenimiento.

Además de la inspección del equipo en sí, se deben considerar otras condiciones físicas que pueden afectar la confiabilidad. La construcción física del tablero de distribución puede comprometer la independencia de los componentes que parecen ser completamente redundantes entre sí en el diagrama unifilar. Una fracción significativa de las fallas del equipamiento eléctrico se debe a causas no eléctricas, como la actividad humana, la contaminación física y el mal funcionamiento de los sistemas ambientales, la contaminación por fugas de vapor, agua u otros fluidos de proceso.

IEEE, (2007) recomienda que al realizar una evaluación física de equipos se dé respuesta a las siguientes preguntas:

- El recinto de los equipos está protegido contra el acceso de personas no autorizadas o no calificadas.

- El recinto o ubicación de los equipos tiene barreras efectivas para animales pequeños, roedores u otros.
- Existen barreras, para proteger el equipo de los vehículos en lugares sujetos al tráfico de automóviles, camiones o montacargas.
- Las áreas del equipo eléctrico se mantienen libres de almacenamiento y otros obstáculos que interfieren con el fácil acceso para operación y mantenimiento.
- Los espacios para trabajar cumplen con los códigos aplicables y las reglas de trabajo seguro.
- Se mantiene las tuberías y los conductores alejados del equipo, o están adecuadamente protegidos por recintos a prueba de goteo, tuberías de doble pared o bandejas de goteo.
- Los elementos del equipo crítico que son redundantes entre sí están provistos de separación para reducir la probabilidad de que una avería se propague a otra unidad, o de un evento externo como daños mecánicos, fugas de agua o incendios que afecten a ambos.
- El tablero de distribución está provisto de barreras internas entre circuitos redundantes y buses para evitar que las fallas de arco afecten a múltiples circuitos.
- Funcionan los equipos de ventilación, calefacción y refrigeración que dan servicio a las salas de equipos eléctricos, se monitorean las temperaturas para detectar rápidamente fallas en el control ambiental.
- Se filtran y extraen los suministros de aire de las áreas de la instalación que es poco probable que provoquen la exposición del equipo a altos niveles de humedad o a materiales conductores o corrosivos
- Están las entradas de cableados debidamente selladas contra el ingreso de partículas del ambiente exterior a la sala eléctrica y el interior de los tableros de distribución.

- Está el equipo ubicado por encima de los niveles potenciales de inundación, se proporcionan almohadillas de limpieza para mantener los derrames o fugas de agua en el piso y fuera del equipo.
- Hay guardas protectoras o cubiertas en los controles del operador que puedan causar interrupciones si se golpean o rozan, como interruptores de disparo y botones de apagado de emergencia.
- Hay luces indicadoras quemadas o inoperativas en los interruptores automáticos o en los paneles de control y relés.
- Hay relés con objetivos que no se hayan reiniciado por eventos de disparo pasados
- Se proporcionan indicadores de falla a tierra en sistemas sin conexión a tierra, muestran fallas sin resolver, están monitoreados de forma remota.
- Se proporciona medición en equipos críticos, se supervisa de forma remota.
- Existen disposiciones para monitorear los circuitos de control y protección y las fuentes de alimentación del tablero para detectar condiciones tales como fallas internas o pérdida de la fuente de alimentación.
- Está el equipo claramente etiquetado, siguiendo un esquema de identificación consistente. El etiquetado está actualizado o los interruptores que están en servicio todavía están etiquetados como "de repuesto" y los interruptores que están apagados todavía están etiquetados con una designación de carga.
- Se proporcionan buses mímicos en los seccionadores o interruptores, tableros de distribución y paneles de control.
- La instalación se adapta fácilmente a los procedimientos de mantenimiento al proporcionar características tales como espacios libres de trabajo generosos, buenos niveles de luz, disposiciones para la aplicación de terrenos de protección, paneles de acceso con bisagras o atornillados,

acceso seguro a conexiones de cables y barras atornilladas para termografía, entre otros.

7.3.1. Condiciones operativas

Los aparatos eléctricos deben operarse en una atmósfera seca para obtener mejores resultados, pero esto a menudo es imposible; por lo tanto, se deben tomar precauciones para minimizar la entrada de humedad. La condensación de humedad en los aparatos eléctricos puede causar oxidación del cobre o aluminio y fallas en la conexión.

La configuración y las características del sistema de distribución deben permitir las labores de mantenimiento sin interrupción de la carga o con una mínima pérdida de disponibilidad. A menudo, el mantenimiento preventivo del equipo no se realiza o se aplaza porque se requiere la interrupción de la carga o parte del sistema. Esto puede requerir la instalación de equipos y circuitos alternativos para permitir el mantenimiento de rutina o de emergencia en un circuito mientras que el otro suministra la carga crítica que no se puede apagar.

- Circuitos duales para equipos críticos
- Subestaciones de doble extremo
- Desempates
- Interruptores extraíbles
- Fuentes de energía auxiliares
- Fuentes de servicios públicos redundantes
- Generadores en sitio redundantes

El equipo que se aplica incorrectamente no brindará un servicio confiable, independientemente de cuán bueno o cuánto se logre el mantenimiento

preventivo. La medida más razonablemente aceptada es realizar una modificación correctiva.

7.3.2. Mantenimiento

Cualquier equipo destinado para la distribución eléctrica inicia un proceso de deterioro desde el momento en que es instalado, la velocidad de este proceso dependerá de las características del equipo, las condiciones del sitio donde opera y el grado de utilización.

7.3.2.1. Deterioro y causas de falla eléctrica

El deterioro es normal, pero si este no es controlado su progreso puede causar funcionamiento anormal o incluso una falla. Condiciones ambientales adversas y estrés del sistema, como sobrecarga, ciclo de trabajo severo, aumentos de carga y las condiciones cambiantes de voltaje pueden acelerar el proceso de deterioro.

Un programa de mantenimiento preventivo puede detectar y mitigar estas condiciones al desarrollar procedimientos para lograr mantener controlados los efectos de corrosión, agua, polvo, alta o baja temperatura ambiente, alta humedad, vibración, entre otros.

7.3.2.2. Programas de mantenimiento

Son actividades que sirven para corroborar que el equipo eléctrico se mantenga funcionando limpio, seco, con fricción y corrosión mínima a través de técnicas de mantenimiento tales como inspección visual, ejercitación y pruebas eléctricas.

Un programa de mantenimiento no eliminara el cien por ciento de las fallas, pero minimizara su ocurrencia. Se deben eliminar las fallas fundamentales que causan problemas continuos y de ser posible implementar una mejora del sistema.

Es necesario tener presente que cada vez que se realiza un mantenimiento, existe la posibilidad de introducir fallas debido a un mantenimiento inadecuado, por esa razón los procedimientos que no demuestren su valor con el tiempo deben eliminarse.

7.3.2.3. Tipo de mantenimiento

IEEE, (2018) analiza tres tipos de mantenimiento para equipos de energía eléctrica; mantenimiento de averías / correctivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento predictivo. El primero, el mantenimiento correctivo / de averías es simplemente arreglar el equipo cuando se daña. No se hace nada para evitar que el equipo falle, o para extender el tiempo de funcionamiento antes de que falle. Para esta norma, la ejecución hasta la falla se considera sin mantenimiento y tanto el mantenimiento predictivo como el preventivo se incluyen cuando esta norma trata sobre el mantenimiento preventivo.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es el proceso para determinar la combinación óptima de actividades de mantenimiento (correctivas, predictivas o preventivas) que se aplicarán a las diversas partes de la instalación eléctrica para mantener la confiabilidad y disponibilidad necesarias al costo total mínimo.

7.3.2.4. Historiales de mantenimiento

Dado que realizar un análisis RCM requiere una gran cantidad de información, y mucha de esta información no está disponible al principio de la fase de diseño, el análisis RCM para un nuevo producto no se puede completar hasta justo antes de la producción. Los datos se dividen en cuatro categorías: características de falla, efectos de falla, costos y capacidades y procedimientos de mantenimiento.

7.3.2.4.1. Características de falla

El mantenimiento preventivo era efectivo solo para ciertas distribuciones de probabilidad subyacentes. Los componentes y elementos, por ejemplo, para los que se aplica una tasa de falla constante no se benefician del mantenimiento preventivo. Solo cuando hay una probabilidad creciente de falla, se debe considerar el mantenimiento preventivo. Tenga en cuenta que muchos componentes o sistemas se modelan con una tasa de fallas constante, pero en realidad muchos exhiben características de desgaste, que requieren mantenimiento preventivo. Es por lo que RCM se realiza en componentes por modo de falla.

7.3.2.4.2. Efectos de fallas

Los efectos de fallas de algunos elementos son menores o incluso insignificantes. La decisión de utilizar o no mantenimiento preventivo para tales artículos se basa puramente en los costos. Si es menos costoso permitir que el artículo falle (y luego realizar el mantenimiento correctivo) que realizar el mantenimiento preventivo, el artículo puede fallar. Como se indicó anteriormente, permitir que un elemento falle se denomina ejecutar hasta fallar.

7.3.2.4.3. Costos

Los costos que se deben considerar son los costos de realizar una tarea de mantenimiento preventivo para un artículo dado, el costo de realizar el mantenimiento correctivo para ese artículo y las sanciones económicas, si las hubiera, cuando ocurre una falla operativa.

7.3.2.4.4. Capacidades y procedimientos de mantenimiento

Antes de seleccionar ciertas tareas de mantenimiento, el analista debe comprender cuáles son las capacidades, o están planificadas, para el sistema. En otras palabras, cuáles son o serán los niveles de habilidad disponibles, qué herramientas de mantenimiento están disponibles o están planificadas y cuáles son los diagnósticos que se están diseñando en o para el sistema.

En la tabla siguiente se enumeran algunas de las fuentes de datos para el análisis RCM. Se debe tener en cuenta que cuando se aplica RCM a un producto que ya está en uso, los datos históricos de mantenimiento y fallas serán entradas para el análisis. Cuando los datos históricos no están disponibles o durante las fases de diseño de un sistema, los datos genéricos son una fuente invaluable para establecer una línea de base y realizar análisis comparativos en el sistema.

Tabla XV. **Fuente de datos para el análisis RCM**

Fuente de los datos	Comentario
Requerimientos de lubricación	Determinado por el diseñador. Para los artículos listos para usar que se integran en el producto, es posible que se disponga de instrucciones y requisitos de lubricación.
Manuales de reparación	Para la integración de artículos listos para usar en el producto.
Dibujos de ingeniería	Para la integración de artículos nuevos y listos para usar en el producto.
Lista de partes de repuesto	Para la integración de artículos listos para usar en el producto.
Informes de eficiencia y calidad	Para la integración de artículos listos para usar en el producto.
Otros documentos técnicos	Para la integración de artículos nuevos y listos para usar en el producto.
Observaciones registradas	Desde la prueba de nuevos artículos y el uso en el campo de los artículos listos para usar que se integran en el producto.
Diagrama de bloques del hardware	Para la integración de artículos nuevos y listos para usar en el producto.
Lista de materiales	Para la integración de artículos nuevos y listos para usar en el producto.
Diagrama de bloques funcional	Para la integración de artículos nuevos y listos para usar en el producto.
Planes de mantenimiento existentes	Para la integración de artículos listos para usar en el producto. También puede ser útil si el nuevo producto es una pequeña mejora evolutiva de un producto anterior.
Ordenes de mantenimiento	Para la integración de artículos listos para usar en el producto.

Fuente: IEEE. (2012). *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*.

7.3.2.5. Repuestos

Una revisión de los niveles de existencias de repuestos para equipos críticos puede ayudar a asegurar niveles más altos de confiabilidad asociados

con tiempos de interrupción de corta duración de reemplazo con repuesto, en lugar de interrupciones de reparación en el lugar mucho más prolongadas.

Cada componente del sistema eléctrico debe considerarse en su relación con el proceso crítico y el tiempo de inactividad. El valor de llevar piezas de repuesto debe sopesarse cuidadosamente cuando las interrupciones prolongadas del proceso podrían resultar de la falla de un solo componente.

Mantener un inventario de repuestos críticos adecuado basado en las recomendaciones de los fabricantes y las tendencias de mantenimiento específicas del sitio es importante para limitar el tiempo de inactividad debido a la espera de la entrega de las piezas.

7.4. Confiabilidad de redes eléctricas

El término confiabilidad y disponibilidad tienen significados muy especializados, la confiabilidad es el desempeño de un conjunto de dispositivos a lo largo de un espacio de tiempo.

La ingeniería de confiabilidad es parte del diseño que aplica la teoría científica para garantizar que un equipo efectuar su tarea durante el periodo de tiempo requerido dentro de un escenario dado. Esto incluye diseñar en la capacidad de mantener, probar y dar soporte al producto durante todo su ciclo de vida. Esto se logra al mismo tiempo que otras disciplinas de diseño contribuyendo a la selección de la arquitectura del sistema, materiales, procesos y componentes, tanto software como hardware, seguido de la verificación de las selecciones realizadas mediante análisis y pruebas exhaustivos. La disponibilidad generalmente se refiere a la calidad o estado de estar inmediatamente listo para su uso.

El término confiabilidad se refiere a la noción de que el sistema realiza correctamente su tarea especificada durante un período de tiempo determinado. El término disponibilidad se refiere a la preparación de un sistema para realizar su tarea inmediatamente, en un momento determinado. Ambos términos tienen definiciones precisas dentro de la disciplina de la ingeniería de confiabilidad y, por lo general, tienen ecuaciones o métodos específicos para proporcionar métricas cuantitativas para cada uno de ellos.

7.4.1. Distribución de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad son ecuaciones matemáticas que describen la probabilidad de que ocurra un evento particular con respecto al tiempo. Para el análisis de confiabilidad, lo que es de gran interés es la distribución de probabilidad de falla. La distribución más común para los análisis de confiabilidad de energía es la distribución exponencial. Esta función describe un modo de falla aleatoria, donde el MTBF es el parámetro crítico.

IEEE, (2015) Si la distribución subyacente para cada elemento es exponencial y se conocen las tasas de falla para cada elemento, entonces la confiabilidad del sistema se puede calcular usando la Ecuación:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Donde:

λ es la tasa de fracaso (inversa de MTBF)

t es el tiempo que el sistema debe funcionar

e es la base de los logaritmos naturales

7.4.1.1. Confiabilidad de sistemas en serie

Cuando existen dos componentes en serie, los dos deben funcionar para que el sistema funcione y el sistema no puede ser más confiable que el componente menos confiable, esta configuración a menudo se le llama configuración del enlace más débil.

7.4.1.2. Confiabilidad de sistemas con redundancia

Cuando existen componentes en paralelo, se consideran sistemas redundantes y proveen dos posibles caminos de operación. Si alguno de los dos caminos es funcional el sistema puede funcionar. La confiabilidad de un sistema se calcula encontrando la probabilidad de fallar ($1-R(T)$) para cada una de las rutas, el producto de las probabilidades de falla.

7.4.2. Evaluación de confiabilidad

La evaluación de la confiabilidad de una instalación eléctrica existente debe incluir la inspección del sistema en varios niveles:

7.4.2.1. Suministro de energía

Una empresa de servicios públicos está un poco limitada por el sistema disponible en el sitio del cliente y la inversión que puede hacerse. Sin embargo, la mayoría de las empresas de servicios públicos están dispuestas a analizar los diversos sistemas de suministro que están disponibles para sus clientes. Muchas veces, hay una opción disponible que satisfará las necesidades exactas de confiabilidad de una instalación específica.

7.4.2.2. Configuración

La configuración del sistema, según diagramas unifilares, definirá la confiabilidad inherente del sistema que se puede esperar sin agregar o renovar equipos. Este debe ser el primer nivel de análisis, en el que se pueden identificar las vulnerabilidades debidas a rutas únicas, puntos de falla de modo común, falta de capacidad, entre otros.

7.4.2.3. Control y protección

Por debajo de la configuración se encuentra el sistema de control y protección. Incluso si la configuración del sistema es adecuada para proporcionar el nivel requerido de confiabilidad, su desempeño puede verse comprometido por una falla del sistema de control y protección. Los controles como los esquemas de transferencia automática de bus y los sistemas de arranque del generador de reserva deben funcionar correctamente para hacer que las rutas o fuentes de energía alternativas estén disponibles para alimentar las cargas en caso de que falle la fuente primaria. Las protecciones deben coordinarse selectivamente para separar las cargas de las partes con fallas del sistema y evitar que las fallas en una ruta o parte del sistema provoquen la interrupción de múltiples rutas o fuentes.

7.4.2.4. Instalación física

Se debe revisar la disposición física de los equipos eléctricos. Está el equipo adecuadamente protegido contra daños físicos y peligros ambientales. Se proporcionan las rutas redundantes con segregación física de modo que una falla importante de una parte del equipo no se pueda propagar fácilmente a equipos redundantes.

7.4.2.5. Operación y mantenimiento

Las prácticas de operaciones y mantenimiento (O&M) son críticas para lograr la confiabilidad diseñada del sistema. La puesta en servicio eficaz ayuda a garantizar que los sistemas de control y protección funcionen según el diseño. El mantenimiento preventivo puede reducir las tasas de fallas y un nivel adecuado de existencias de repuestos puede reducir los tiempos de reparación cuando ocurren fallas. Las políticas, los procedimientos, la documentación y la capacitación efectivos del personal de O&M reducen las interrupciones debido a la actividad humana y mejoran el tiempo de respuesta del operador cuando ocurren fallas.

- Análisis de criticidad

El análisis de modo, efectos y criticidad de falla (AMECF) es una técnica de evaluación y diseño de confiabilidad que examina los riesgos de falla en un sistema para determinar los efectos en el sistema general y el equipo dentro del sistema. Este análisis se compone de dos análisis separados: el AMECF y el análisis de criticidad (AC). El AMECF clasifica cada falla potencial según la gravedad del éxito de la misión y la seguridad del personal / equipo. La AC proporcionará estimaciones de las tasas de fallas críticas del sistema basadas en el historial pasado y la información actual.

El AMECF debe iniciarse tan pronto como se disponga de información preliminar sobre el diseño.

El AMECF es un documento vivo que no solo es beneficioso cuando se usa en la fase de diseño sino también durante el uso del sistema. A medida que

se disponga de más información sobre el sistema, el análisis debe actualizarse para proporcionar el mayor beneficio.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUME DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Ingeniería y diseño

1.1.1. Dibujos

1.1.2. Información de equipos existentes

1.1.3. Diagramas unifilares

1.1.3.1. Información requerida

1.1.3.2. Equipo para levantamiento de campo

1.1.4. Corrientes de corto circuito

1.1.4.1. Modelado de instalación eléctrica

1.1.4.2. Cálculo de corriente de falla

1.2. Sistema eléctrico

1.2.1. Sistema de distribución

1.2.1.1. Sistema radial Simple

1.2.1.2. Sistema radial expandido

1.2.1.3. Sistema selectivo primario

1.2.1.4. Sistema de lazo primario

1.2.1.5. Sistema selectivo secundario

- 1.2.1.6. Red secundaria spot
 - 1.2.2. Sistemas de emergencia
 - 1.2.2.1. Sistemas redundantes
 - 1.2.2.2. Generadores de emergencia
 - 1.2.2.3. Transferencia eléctrica
 - 1.2.3. Filosofía de operación
 - 1.2.4. Protecciones eléctricas
 - 1.2.4.1. Coordinación de protecciones
 - 1.3. Evaluación de equipos
 - 1.3.1. Condiciones operativas
 - 1.3.2. Mantenimiento
 - 1.3.2.1. Deterioro y causas de falla eléctrica
 - 1.3.2.2. Programas de mantenimiento
 - 1.3.2.3. Tipo de mantenimiento
 - 1.3.2.4. Historiales de mantenimiento
 - 1.3.2.5. Repuestos
 - 1.4. Confiabilidad de redes eléctricas
 - 1.4.1. Distribución de probabilidad
 - 1.4.1.1. Confiabilidad de sistemas en serie
 - 1.4.1.2. Confiabilidad de sistemas con redundancia
 - 1.4.2. Evaluación de confiabilidad
 - 1.4.2.1. Suministro de energía
 - 1.4.2.2. Configuración
 - 1.4.2.3. Control y protección
 - 1.4.2.4. Instalación física
 - 1.4.2.5. Operación y mantenimiento
 - 1.5. Análisis de criticidad
 - 1.5.1. Teoría del análisis de criticidad
 - 1.5.2. Matriz de criticidad

2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Diseño de investigación

El estudio por realizar es de tipo no experimental porque las variables que definen las condiciones ambientales bajo las que se encuentran instalados los equipos y las condiciones de operación no pueden ser manipuladas, durante la investigación únicamente se realizarán observaciones y se obtendrán los datos de forma directa para luego ser analizados.

9.2. Tipo de estudio

El tipo de estudio a realizar es mixto porque en el proceso de estudio de las condiciones ambientales en donde se encuentran instalados los equipos y las condiciones operacionales, existen varios indicadores de tipo cuantitativo y cualitativo.

9.3. Alcance de investigación

El alcance de la investigación a realizar es correlacional porque la relación entre las variables de confiabilidad y estrés operacional, permitirán predecir el nivel de criticidad de la instalación eléctrica de los servicios auxiliares de hidroeléctrica Jurún Marinalá.

9.4. Variables e indicadores

Las variables y los indicadores de estudio se muestran en la tabla siguiente:

Tabla XVI. **Variables e indicadores**

Variab les	Indicadores	Tipo
Condición ambiental	Temperatura	Cuantitativo
	Humedad	Cuantitativo
	Polución	Cualitativo
Condiciones operacionales	Clasificación (Rating)	Cuantitativo
	Corriente	Cuantitativo
	Voltaje	Cuantitativo
	Cantidad de Operaciones	Cuantitativo
	Obsolescencia	Cualitativo
Topología de la Red	Tipo	Cualitativo
Redundancias	Numero de alimentaciones	Cuantitativo
Tiempo medio de fallo	Tiempo	Cuantitativo
Tiempo medio entre fallos	Tiempo	Cuantitativo
Tiempo medio de inactividad	Tiempo	Cuantitativo
Perdidas por tiempo de inactividad	Dinero	Cuantitativo

Fuente: elaboración propia.

9.5. Fases de investigación

Fase1. Revisión documental. Antes de iniciar el trabajo de campo, se realizará una investigación documental acerca de trabajos realizados previamente en relación con la confiabilidad de redes eléctricas y mantenimiento. En ellas se ampliará sobre distintas metodologías para analizar confiabilidad de instalaciones eléctricas para poder adoptar la que mejor se adapte al tipo de

instalación, de igual forma se buscara como determinar el impacto del mantenimiento preventivo en la fiabilidad, con esto se podrán realizar protocolos de levantamiento de información y no dejar de lado información de campo que después se pueda necesitar en la solución del problema.

Fase 2. Levantamiento de información. En esta fase se realizarán algunas visitas a campo para obtener la información necesaria para realizar la evaluación de criticidad y estrés operacional de los equipos empleados para la distribución eléctrica de los servicios auxiliares de Hidroeléctrica Jurún Marinalá. Con base a la información que se obtenga, se generará un diagrama unifilar para coleccionar los datos más importantes de la instalación eléctrica y una inspección visual de los equipos. La información se recopilará por medio de formularios compuestos por las tablas indicadas en el apéndice.

Fase 3. Trabajo de escritorio. Tras obtener la información de la instalación eléctrica se emplearán métodos probabilísticos para realizar un análisis de confiabilidad del sistema eléctrico de servicios auxiliares el cual en conjunto con la evaluación de estrés operacional documentado en los apéndices ayudara a determinar la criticidad de cada uno de los equipos para poder definir el orden de implementación del plan de modernización y mantenimiento. Se propondrán las políticas y los procedimientos de operación y mantenimiento adecuados para lograr la confiabilidad del nuevo sistema.

Fase 4. Presentación de resultados. En esta fase se elaborará un resumen de la información de forma tabulada y una matriz de criticidad a partir del nivel de confiabilidad y estrés operacional. Una información primordial para este estudio será el presupuesto para la implementación de la solución que se obtenga, por lo que se contempla poder presentar una tabla con la posible solución al problema y su costo de implementación en orden de criticidad.

9.6. Muestreo

Al ser un universo finito los equipos que conforman la distribución eléctrica de servicios auxiliares de Hidroeléctrica Jurún Marinalá se utilizará la totalidad de la población para el análisis probabilístico de confiabilidad.

9.7. Resultados esperados

Los resultados esperados tras la investigación son: la obtención de un documento guía para la implementación de la modernización de las instalaciones eléctricas de servicios auxiliares por etapas en base a la criticidad y un plan de mantenimiento preventivo según la tecnología, ambos planes incluirán un presupuesto estimado para su implementación.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

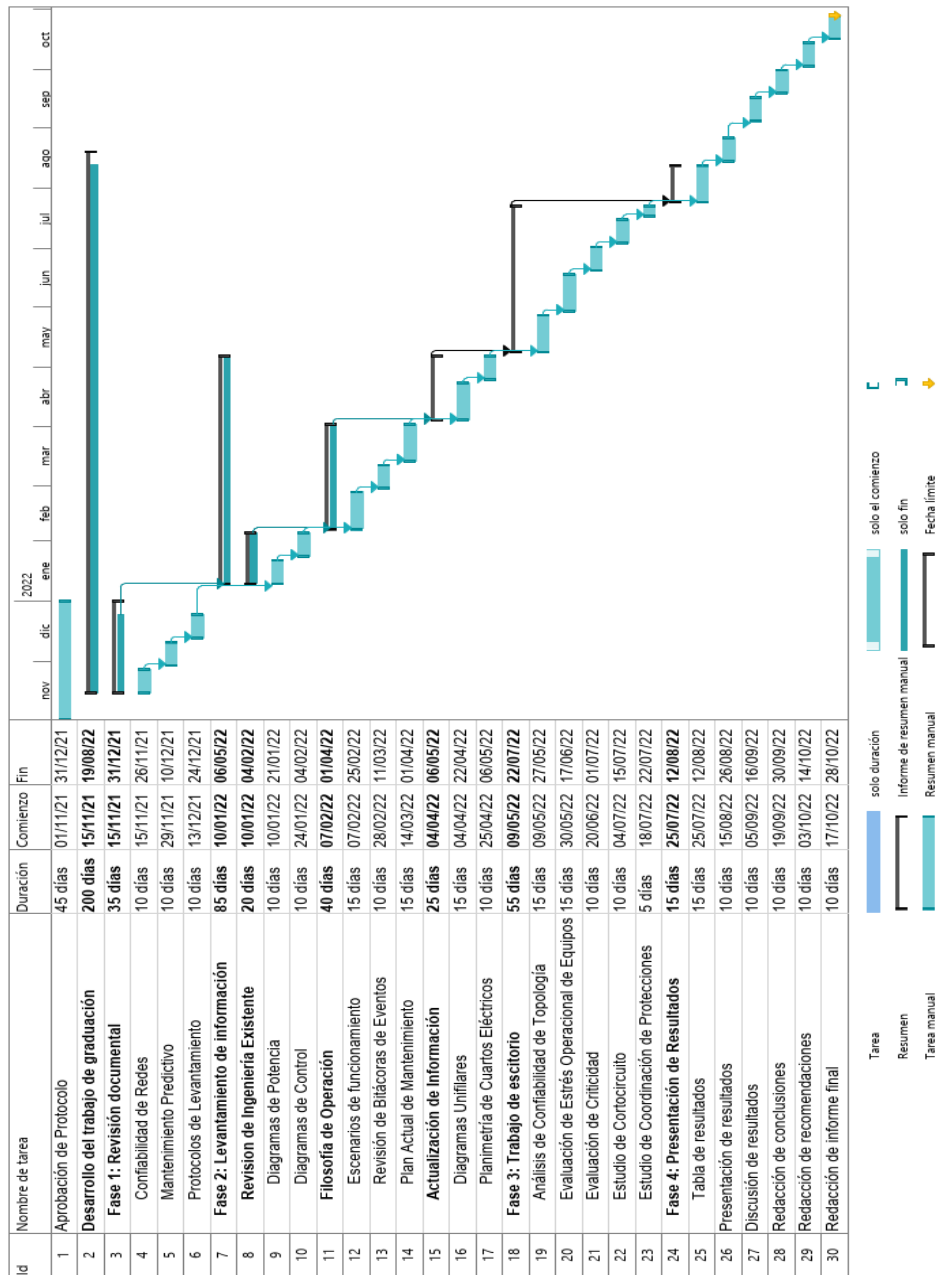
Dentro de las técnicas del análisis de la información, se realizará una reducción de la información presentada en la colección de estándares IEEE 3000 para garantizar las mejores prácticas actuales en el diseño de instalaciones eléctricas, se listarán las distintas filosofías de operación de la planta bajo análisis, tanto en condiciones normales y de emergencia. Además de información de manuales, procedimientos, investigaciones similares y otros documentos filtrados por el investigador.

Se identificarán las unidades de texto u observación, tales como procedimientos empíricos, criterios, ideas, requisitos de seguridad ocupacional, programas de operación, normativas y su aplicación para su codificación y clasificación, para la elaboración de tablas que nos ayuden a definir cuestiones de criticidad en cada uno de los equipos según su frecuencia de fallo. Estas tablas de análisis de frecuencia se compararán con modelo teóricos y otras normativas para validarlas y poder usarlas en la propuesta de modernización del equipo para la distribución eléctrica de los servicios propios.

Se realizarán gráficas donde se demuestren la probabilidad de fallo de cada uno de los equipos según su función, los cuales servirán para establecer una matriz de criticidad, que ayude a determinar la prioridad de atención de cada uno de los equipos.

11. CRONOGRAMA

Figura 10. Cronograma investigación



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DE ESTUDIO Y RECURSOS NECESARIOS

Para poder desarrollar esta investigación, se necesitarán varias horas de trabajo en campo y de oficina, recursos monetarios para sufragar las visitas a planta, materiales consumibles para toma de información o documentación de procedimientos y recurso humano para apoyo en el levantamiento de información, recursos que deberán estar disponibles acorde al cronograma de ejecución y a las fechas específicas autorizadas para acceder a las instalaciones de hidroeléctrica Jurún Marinalá, el material que se genere se entregará al INDE como agradecimiento por el espacio brindado para la investigación.

El financiamiento de la investigación será sufragado en un 100 % por el investigador, dentro de los recursos que serán necesarios se tienen:

Recurso humano: para la investigación se requiere de un ingeniero electricista especialista en equipos para realizar evaluación del estado de equipo eléctricos, un ingeniero electricista especialista en redes y sistemas de distribución para análisis, dos electricistas con conocimiento de seguridad eléctrica, ropa ignífuga y herramienta eléctrica básica.

Para el tratamiento de la información recabada en campo se necesitará: equipo de cómputo, software para dibujo, software para modelado de instalaciones eléctricas y software para renderizado, en campo se debe contar con una cámara fotográfica de alta resolución, odómetro, cámara termográfica, medidor de distancia digital, pinza amperométrica, detector de presencia de tensión y ropa ignífuga.

Tabla XVII. Presupuesto de investigación

Recurso material, físico y tecnológico				
No.	Descripción	Unidad	Unidad	Costo (Q)
1	Equipo de Computo	1	Q12,000.00	Q12,000.00
2	AUTOCA (licencia por mes)	4	Q1,716.00	Q6,864.00
3	SKM Power Tools (licencia vitalicia)	1	Q52,000.00	Q52,000.00
4	Sketchup Renderizado (licencia anual)	1	Q975.00	Q975.00
5	Cámara Digital	1	Q3,700.00	Q3,700.00
6	Cámara Termográfica FLIR C5	1	Q4,300.00	Q4,300.00
7	Pinza Amperométrica	1	Q6,400.00	Q6,400.00
8	Odómetro	1	Q2,100.00	Q2,100.00
9	Medidor digital de distancia	1	Q3,100.00	Q3,100.00
10	Detector de presencia de tensión	1	Q850.00	Q850.00
11	Ropa ignifuga (Kit)	1	Q1,848.00	Q1,848.00
12	Útiles de Oficina	1	Q2,000.00	Q2,000.00
13	Viáticos y Kilometrajes	1	Q7,875.00	Q7,875.00
Subtotal				Q104,012.00
Recurso humano				
No.	Descripción	Horas	Unidad	Costo (Q)
1	Ingeniero Experto en Equipos	30	Q585.00	Q17,550.00
1	Ingeniero Experto en Redes	64	Q663.00	Q42,432.00
2	Técnicos Electricistas	80	Q140.00	Q11,200.00
1	Asesor	20	Q125.00	Q2,500.00
Subtotal				Q73,682.00
Resumen				
1	Recurso material, físico y tecnológico			Q104,012.00
2	Recurso humano			Q73,682.00
Total				Q177,694.00

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

1. Arriaga, A. (1994). *Evaluación de confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución*. (Tesis de maestría) Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile. Recuperado de <https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/paperspdf/aarriagada.pdf>
2. Campos-López, O.; Toledo-Eslava, G.; Toledo-Velásquez, M. y Toledo-Eslava, R. (s.f.). *Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos*. Redalyc. Recuperado de <https://www.redalyc.or>
3. García, G. (2006). *Introducción a la teoría de la confiabilidad y su aplicación en el diseño y mantneimiento de equipos industriales de un proceso de renovación*. (Tesis de Profesor Asociado) Universidad NAcional de Colombia. Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/21285>
4. González, A. (2007). *Mejoramiento de la confiabilidad en sistemas de distribución mediante reconfiguración de circuitos primarios*. (Tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11059/1043>
5. IEEE. (abril 1994). *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.1994.121642

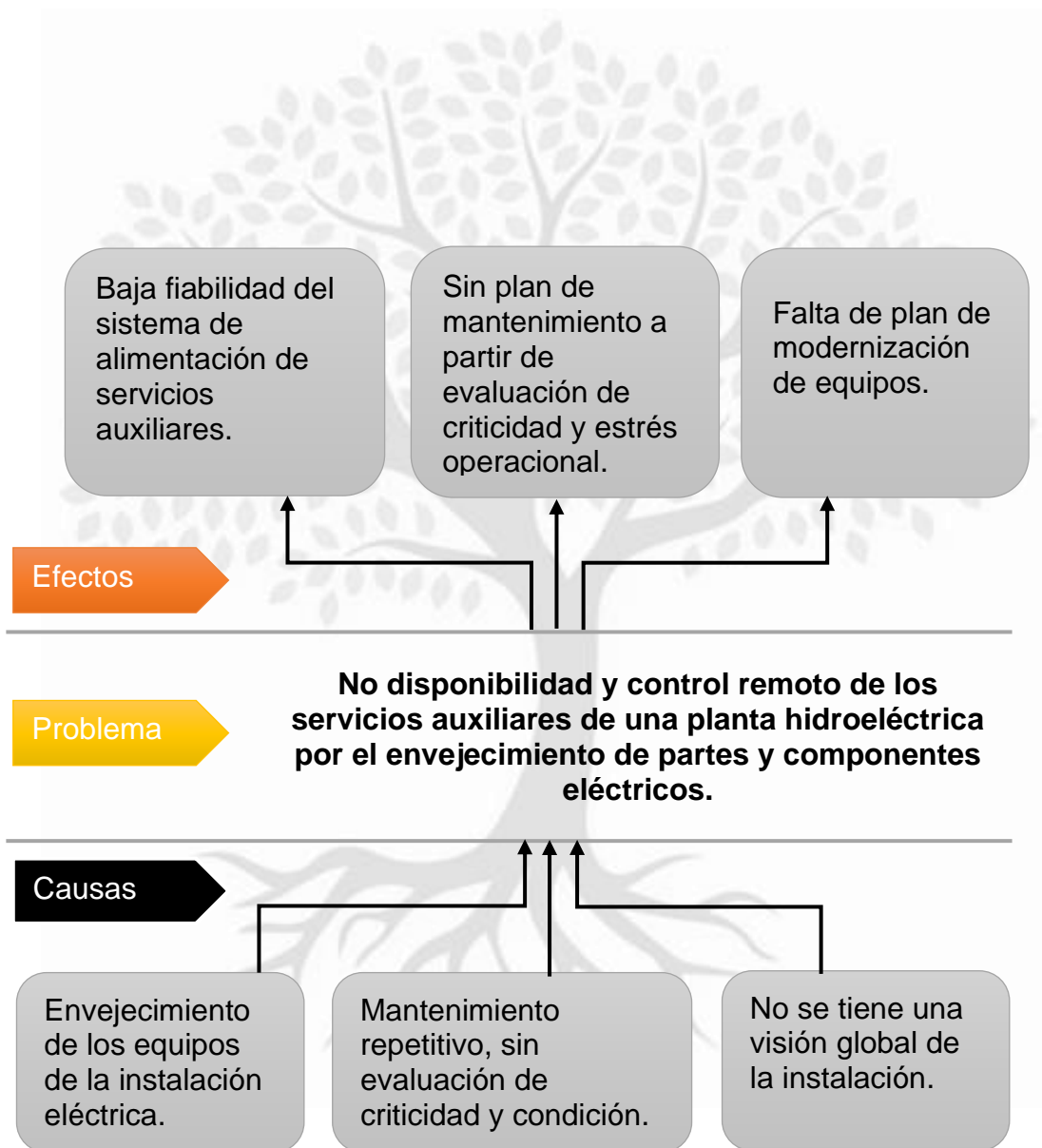
6. IEEE. (abril 1996). *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.1996.85950
7. IEEE. (octubre 1998). *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (Brown Book)*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.1998.88568
8. IEEE. (septiembre 2001). *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book)*. IEEE. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.2001.93369
9. IEEE. (noviembre 2007). *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.2007.380668
10. IEEE. (marzo 2008). *IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.2008.4639522
11. IEEE. (febrero 2012). *Historical Reliability Data for IEEE 3006 Standards: Power Systems Reliability*. IEEE Standards. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.2012.6745993
12. IEEE. (mayo 2012). *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.2012.6209381

13. IEEE. (enero 2015). *IEEE Recommended Practice for the Use of Probability Methods for Conducting a Reliability Analysis of Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.2015.7034995
14. IEEE. (enero 2016). *IEEE Recommended Practice for Evaluating the Reliability of Existing Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.2016.7544439
15. IEEE. (agosto 2018). *IEEE Recommended Practice for Determining the Impact of Preventative Maintenance on the Reliability of Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE Std. Recuperado de doi:10.1109/IEEESTD.2018.8320995
16. Iglesias, L. (mayo 2010). *Estudio de los sistemas de servicios auxiliares en subestaciones de potencia. Caso subestación tipo nodal 230T de CADAFE*. Recuperado de <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/193429>
17. Lewis, J. y Domin, T. (2014). *Protective Relaying Principles and Applications*. Estados Unidos: CRC Press.
18. Luna, C. (2006). *Transferencia y sincronización automática de generadores de emergencia en instalaciones industriales*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0617_EA.pdf
19. Martínez, D. (2010). *Análisis para el rediseño del sistema eléctrico de una subestación industrial e implementación de rutinas para su*

- mantenimiento, en una planta de embotellado de agua pura.* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0162_ME.pdf
20. Martínez, M. (2017). *Estudio de cortocircuito, calculo de ajustes y puesta en servicio de las protecciones eléctricas de la línea de transmisión de un parque eólico de potencia 23.1 Megawatts hacia subestación eléctrica de switcheo de 138 kilovoltios.* (Tesis de Profesor Asociado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
21. Meza, J. (2006). *Análisis técnico en sistemas de alimentación ininterrumpido trifásico MGE, conectados en redundancia en centros de cómputo en Guatemala.* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0168_EO.pdf
22. Pérez, R. (2013). *Propuesta para la implementación del plan de mantenimiento proactivo en una central hidroeléctrica.* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0185_ME.pdf
23. Sierr-Gil, E., y Lajes-Choy , S. (enero 2010). *Evolución de los métodos de evaluación de la confiabilidad para redes eléctrica de distribución.* Redalyc. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329127745006.pdf>
24. Vargas, E., y Ospina, M. (2018). *Informe de coordinación de protecciones con el software ETAP, para los servicios auxiliares AC de una central hidroeléctrica.* Colombia: Biblioteca UDFJC. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13450>.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

PLAN DE MODERNIZACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE SERVICIOS AUXILIARES DE PLANTA HIDROELÉCTRICA JURÚN MARINALÁ A PARTIR DE EVALUACIÓN DE CRITICIDAD Y ESTRÉS OPERACIONAL		
Objetivo general		
Diseñar un plan de modernización y mantenimiento de la distribución eléctrica de servicios auxiliares de planta hidroeléctrica Jurún Marinalá de potencia instalada 60MW con más de 50 años de antigüedad mediante confiabilidad de redes eléctricas y evaluación de estrés operacional.		
¿Cómo diseñar un plan de modernización y mantenimiento de la alimentación eléctrica de servicios propios para recuperar la fiabilidad de una planta hidroeléctrica de más de 50 años de antigüedad, considerando la criticidad y estrés de los equipos?		
Objetivo específico	Pregunta de investigación	Indicador
1 Establecer las condiciones físicas del equipo y su entorno de instalación en el momento del diseño del plan.	¿Cuáles son las condiciones físicas de los equipos del sistema de distribución eléctrica de los servicios auxiliares y su entorno de instalación al momento del diseño?	Antigüedad de la instalación, número de operaciones, historial de mantenimiento, temperatura, humedad, polución.
2 Determinar la topología de la red de distribución eléctrica y los posibles puntos de mejora.	¿Cuál es la topología de la red de distribución eléctrica de los servicios auxiliares y probabilidad de fallo?	Topología, redundancias.
3 Definir el orden de ejecución del plan de modernización y mantenimiento en función de criticidad y efectos al fallar un componente de la red.	¿Cuál es el orden de ejecución del plan en función de la criticidad y efectos al fallar un componente de la red?	Tiempo de reparación, Tiempo de sustitución de equipo, impacto económico por salida de línea.

Fuente: elaboración propia.